



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ROHOVÉHO DŘEZU

PRODUCTION OF A CORNER SINK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Soldán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: Bc. Josef Soldán
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: Ing. Michaela Císařová, Ph.D.
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba rohového dřezu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o výrobu rohového kuchyňského dřezu s prolisy. Dřez je obdélníkového tvaru s přírubou z oceli 1.4301. Součást bude vyráběna technologií tažení bez ztenčení stěny s využitím konvenčního nástroje.

Cíle diplomové práce:

- Provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- zhodnotit technologičnost součástí,
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- navrhnout a popsat tvářecí nástroj a stroj, včetně základní výkresové dokumentace,
- provést technicko–ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

VALBERG, S. Henry. Applied Metal Forming: Including FEM analysis. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-51823-9.

TSCHATSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 35-403-3216-2.

MARCINIAK, Zdzislaw, John L. DUNCAN a S. Jack HU. Mechanics of sheet metal forming. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 7506 5300 0.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. Hluboké tažení plechu na lisech. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. Knižnice technických aktualit. ISBN 80-030-0221-4.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

SOLDÁN Josef: Výroba rohového dřezu

Práce je zaměřena na výrobu rohového dřezu z plechu z nerezové oceli 1.4301. Na základě analýzy možných řešení výroby byla v souladu se zadáním práce zvolena výroba v několika tažných operacích pomocí konvenčního nástroje, čemuž se následně věnovala i teoretická část této práce. V praktické části byla provedena kontrola technologičnosti, následovaná návrhem vhodného tvaru polotovaru, stanovením počtu tahů v jednotlivých tažných operacích, výpočtem sil a prací a výpočtem parametrů tažidla. Tyto výpočty byly následně ověřeny za použití numerické simulace, která odhalila nedostatky, načež byla vhodně upravena geometrie zadané součásti, aby byly tyto nedostatky odstraněny. Na základě těchto výpočtů byl navržen tažný nástroj, který je koncipovaný jako univerzální. V závěru bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, které potvrdilo ekonomickou výhodu této univerzálnosti.

Klíčová slova: dřez, hluboké tažení, ocel 1.4301, tvarově složitá součást, simulace, MKP, konvenční nástroj

ABSTRACT

SOLDÁN Josef: Production of a corner sink

This diploma thesis is focused on the production of a corner sink from stainless steel sheet 1.4301. Based on analysis of manufacturing possibilities the best solution is to produce corner sink by a conventional tool in several operations, which was the main focus of theoretical part of this thesis. In addition, this choice is in conform with assignment of this diploma thesis. Practical part of this thesis was focused on check of technologicity followed with design of suitable shape of sheet for deep drawing. Further calculation of amount of required draws in specific drawing operations, calculation of drawing forces and works and calculation of parameters of drawing tool. These calculations were checked by numerical simulation which discovered possible defects whereupon the shape of corner sink was modified in order to limit these defects. Based on these calculations the universal drawing tool was designed. In the ending of this thesis the techno-economic evaluation was made which confirmed the economic advantage of this universality.

Keywords: sink, deep drawing, 1.4301 steel, complicated shape part, simulation, FEM, conventional tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOLDÁN, Josef. *Výroba rohového dřezu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118032>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Blansku dne 20.05.2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce, dále pak panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za pomoc týkající se numerické simulace a v neposlední řadě také celé své rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1 ÚVOD.....	9
2 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2.1 Možné způsoby výroby	11
3 TECHNOLOGIE TAŽENÍ.....	13
3.1 Materiály polotovarů a jejich vhodnost pro tažení	14
3.1.1 Korozivzdorné oceli	14
3.2 Napjatost a deformace	16
3.3 Součinitel tažení a počet tažných operací.....	17
3.4 Stanovení poloměru zaoblení funkční hrany tažníku a tažnice	21
3.5 Návrh přístřihu.....	22
3.6 Použití přidržovače	22
3.7 Tažná mezera a vůle	24
3.8 Tažná rychlost, síla a práce	25
3.9 Stroje a nástroje pro konvenční tažení.....	27
3.10 Maziva	30
3.11 Technologičnost.....	31
3.12 Využití výpočetní techniky	32
4 NÁVRH ŘEŠENÍ.....	33
4.1 Analýza technologičnosti a předběžný návrh výrobního postupu.....	34
4.2 Návrh polotovaru.....	35
4.3 Technologické výpočty zadané součásti	36
4.4 Přepočet technologických výpočtů pro 2. verzi zadané součásti	46
4.5 Přepočet technologických výpočtů pro 3. verzi zadané součásti	55
4.6 Konstrukce tažidla a volba lisu.....	60
4.7 Technicko-ekonomické zhodnocení	64
5 ZÁVĚRY.....	69
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	

1 ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

Zpracování kovů má dlouhou historii ve vývoji lidstva. První zmínky o metalurgii pocházejí již z 5. tisíciletí př. n. l. Pravda, tehdy se jednalo o velice primitivní formy zpracovávání měkkých kovů jako například stříbra, zlata, mědi a obecně kovů v přírodě dostupných. Později došlo i ke zpracovávání železa, které se až do doby průmyslové revoluce většinou zpracovávalo (tvářelo) volným kováním či ražením (např. mince (viz obr. 1)).

Průmyslová revoluce započala rozmach hromadné výroby železa a oceli. Zvyšující se požadavky na kvantitu a kvalitu v souvislosti s nově vynalezenými stroji vedl k rozmachu technologií. Již nestačilo „pouhé“ volné kování. Světlo světa spatřily pokročilejší metody objemového tváření, obrábění, kvalitní odlévání, válcování a všemožné další technologie zpracovávání kovů.

Jak čas postupoval kupředu, stále více se se začalo uplatňovat zpracovávání plechů, tedy technologie plošného tváření, mezi které můžeme zařadit ohýbání, stříhání a také tažení.

Mezi přednosti plošného tváření je možnost docílit optimálního tvaru vyráběné součásti s minimálním množstvím materiálu v relativně krátkém čase. Obecně oproti obrábění je mnohem vyšší využitelnost materiálu. Navíc tvářené díly dosahují i lepších pevnostních charakteristik než stejné díly, avšak zhotovené obráběním.

Výrobky zhotovené pomocí hlubokého tažení jsou dnes všudypřítomné, stačí se rozhlédnout kolem sebe. Například součásti karoserie aut, nábytkové závěsy (viz obr. 2), plechové vany, hrnce (viz obr. 4), pánve, kovové vypínače a kuchyňské dřezy (viz obr. 3).



Obr. 1 Athénská mince, 449–404 př. n. l. [1], [2]



Obr. 2 Nábytkový závěs [3]



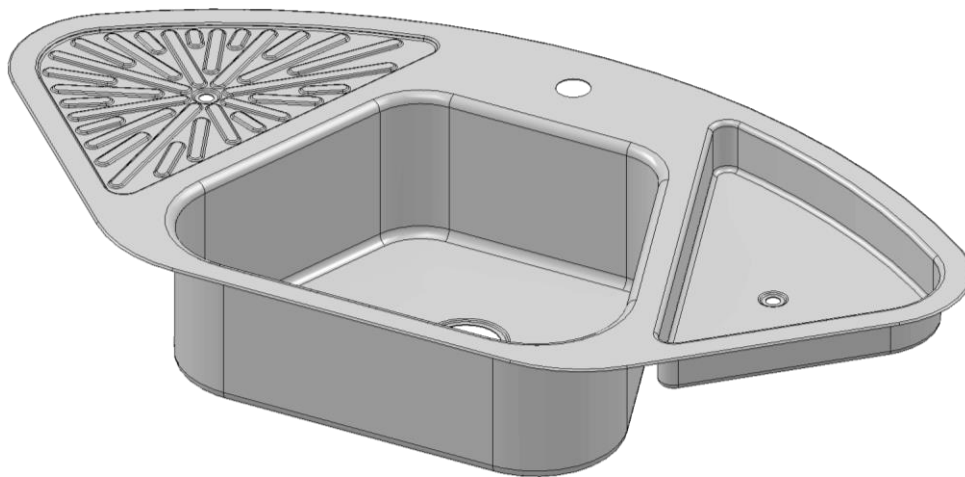
Obr. 3 Kuchyňský dřez [4]



Obr. 4 Sada hrnců [5]

2 ROZBOR ZADÁNÍ [6], [7], [8], [9]

Podstatou práce je návrh výroby rohového dřezu, který je zobrazen na obrázku 5. Vnější rozměry výtažku jsou 1047,5x557,6x172,8 mm. Tloušťka stěny je po celé ploše konstantních 0,8 mm, tažení tedy bude probíhat bez ztenčení stěny. Na výtažek nejsou kladeny požadavky vysoké přesnosti. Jako materiál výtažku bude použit plech tl. 0,8 mm z oceli 1.4301 (X5CrNi18-10; AISI 304), což je chromniklová austenitická korozivzdorná ocel, využívaná především v potravinářském průmyslu s dobrou svařitelností, hlubokotažností a odolností vůči opotřebení. Při tepelném zpracování nebo svařování, konkrétně při teplotách 500 – 900 °C roste náchylnost ke vzniku mezikrystalové koroze.



Obr. 5 Řešená součást – rohový dřez

Výše uvedený dřez lze rozdělit na čtyři základní části:

- hlavní dřez,
- vedlejší dřez,
- okapnice,
- příruba.

Hlavní dřez je určen pro umývání nádobí. Má lichoběžníkový tvar. Dno má mírný spád (10,2 mm) směrem k 2 mm prolisu s odtokovým otvorem. Poloměr zaoblení u dna a u příruby je po celém obvodu konstantních 10 mm. Minimální poloměr zaoblení hran je 60 mm a maximální 90 mm. Hloubka hlavního dřezu je v nejnižším místě 172 mm.

Vedlejší dřez najde své uplatnění především při oplachování ovoce a zeleniny. Má trojúhelníkový tvar s jednou zaoblenou stěnou o poloměru 773,6 mm. Dno má podobně jako hlavní dřez mírný spád (5 mm) směrem k 2 mm prolisu s odtokovým otvorem. Poloměr zaoblení u dna a u příruby je po celém obvodu konstantních 5 mm. Minimální poloměr zaoblení hran je 15 mm a maximální 70 mm. Hloubka vedlejšího dřezu je v nejnižším místě 62 mm.

Jak již název napovídá, okapnice má primární účel pro okapávání umytého nádobí. Je tvořena 2mm prolisy, směřujícími do středu odtokového otvoru. Má podobný tvar jako vedlejší dřez, tedy trojúhelníkový s jednou zaoblenou stěnou o minimálním poloměru 776,5 mm. Stěny výlisku jsou zkoseny pod úhlem 85°, nejsou tedy kolmé k ploše příruby. Dno okapnice je rovné. Poloměr zaoblení u dna a u příruby je po celém obvodu konstantní 2 mm. Minimální poloměr zaoblení hran je 18 mm a maximální 73 mm. Hloubka okapnice je v nejnižším bodě 6 mm.

Příruba má lichoběžníkový tvar s jednou zaoblenou stěnou o poloměru 805,6 mm. Obvod příruby je tvořen lemem s vnitřním poloměrem zaoblení 1,2 mm.

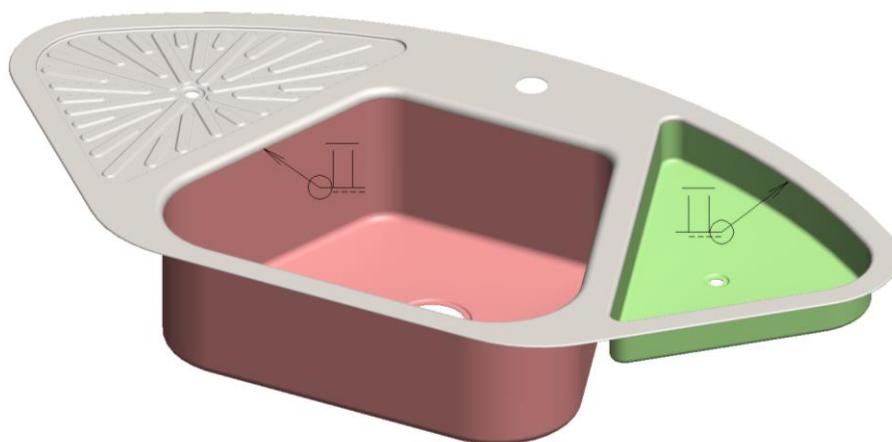
Pro lepší přehlednost byly vytvořeny obrázky křivosti zobrazující křivost zadaného dílu (viz příloha 1). Pro černou oblast je křivost rovna nule či téměř nule a pro červenou oblast $0,5 \text{ mm}^{-1}$.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že se jedná o tvarově velmi složitý díl. Jednotlivé výrobní možnosti jsou uvedeny v podkapitole níže.

2.1 Možné způsoby výroby [10], [11], [12], [13], [14]

- Kombinace tažení a svařování

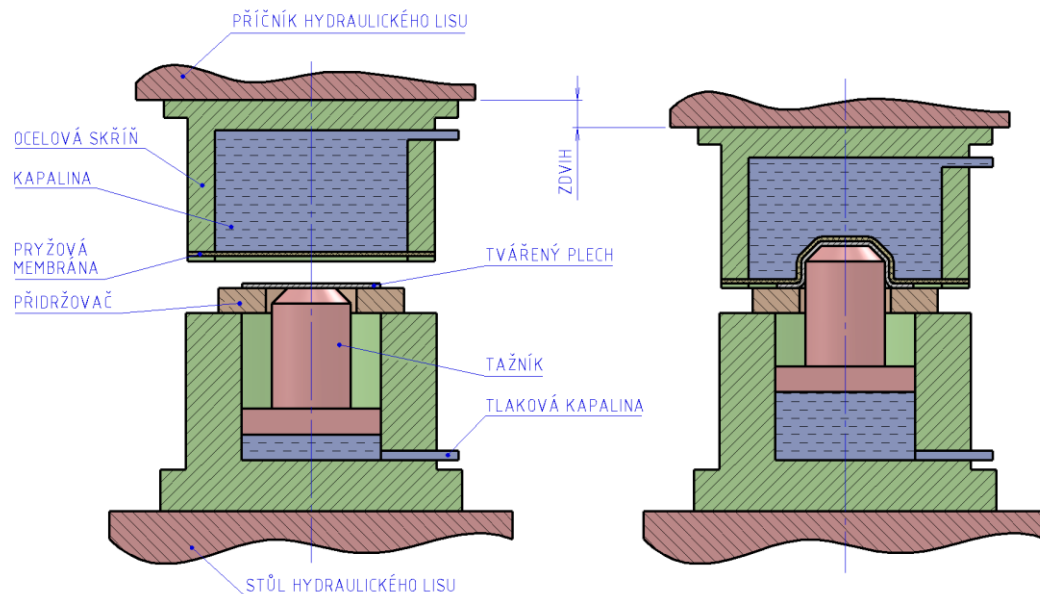
Jednou z možností, jak vyřešit výrobu výše popsaného tvarově složitého dílce je rozdělit jej na jednodušší části (např. hlavní dřež, vedlejší dřež a příruba s okapnicí), pro které by bylo samostatné tažení snazší. Po tažení a stříhání by se jednotlivé části navzájem svařily (viz obr. 6). Výhody tohoto způsobu jsou především jednodušší dílčí tvářecí operace a to jak jejich příprava, tak i praktické provedení. Nevýhodou je složitější svařování, respektive ustavování jednotlivých částí pro finální svaření, které by pravděpodobně bylo řešeno formou upínacího přípravku. Samotné svařování by pak mohlo být jak ruční, tak i robotické. Austenitická ocel je sama o sobě dobře svařitelná, bohužel je tu ono riziko s možným vznikem mezikrystalové koroze. Další nevýhodou je následné opracování svaru např. broušením. Z těchto důvodů je tedy použití této technologie pro výrobu zadané součásti nevhodné.



Obr. 6 Výroba rohového dřezu kombinací tažení a svařování

- Hydroform

Používá se pro hluboká tažení a ohýbání. Zařízení se sestává z pohyblivého příčnicku, s prostorem vyplněným kapalinou, který je od vnějšího prostředí oddělen pryžovou membránou. Dále z pohyblivého stolu hydraulického lisu, na kterém se nachází přidržovač a pohyblivý tažník, na nichž je umístěný plechový přístřih (viz obr. 7). Po spuštění stroje se příčník pohybuje směrem dolů, do té doby, než se pryžová membrána dotkne tvářeného materiálu. V tom okamžiku se začne do prostoru pod tažníkem čerpat kapalina, díky čemuž se tažník začne zvedat a zatlačuje tažený materiál do prostoru příčnicku, kde v reakci působí kapalina příčnicku skrz pryžovou membránu a nutí materiál „obalovat“ tažník.

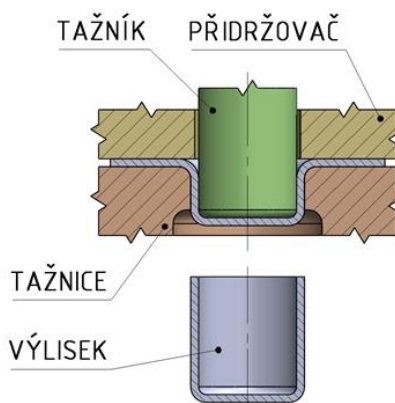


Obr. 7 Schéma metody Hydroform [12], [13]

Mezi výhody této metody pro výrobu zadaného dílce je především možnost zhotovení požadovaného tvaru (vyjma stříhání) v jedné tažné operaci. Mezi nevýhody patří požadavek na speciální tažný nástroj a tažný lis. Z toho důvodu je tedy použití této technologie pro výrobu zadané součásti nevhodné.

- Tažení v několika operacích konvenčním nástrojem

Poslední z nabízených variant je zhotovení výrobku z jednoho přístříhu plechu pomocí několika tažných operací za použití konvenčního nástroje (viz obr. 8).



Obr. 8 Příklad jednooperačního tažení válcového výtažku konvenčním nástrojem [14]

Výhodou tohoto způsobu oproti kombinaci tažení + svařování je, že nehrozí žádné tepelné ovlivnění tvářeného materiálu a na rozdíl od metody hydroform nejsou zapotřebí speciální tažné nástroje a lisy. Právě z těchto důvodů bude pro výrobu onoho drezu použita tato metoda, což je zcela v souladu s požadavkem zadání této práce. Mezi nevýhody této metody patří především, že pro dosažení požadovaného tvaru bude potřeba několika tažných, popř. kalibračních operací, což s sebou nese zvýšení výrobního času a další náklady na tažné nástroje pro každou jednotlivou operaci. Dále s tím souvisí i problematika samotného návrhu výroby tak, aby bylo dosaženo požadované jakosti.

3 TECHNOLOGIE TAŽENÍ [12], [14], [10], [15], [16]

Tažení je technologií plošného tváření¹, při kterém silovým působením nástroje (tažníku a tažnice)² na polotovar (rovinný přístřih plechu) vzniká trvalý prostorový dutý výlisek (výtažek) nerozvinutelného tvaru v jedné nebo více operacích a jehož výsledný tvar je závislý na geometrii použitých nástrojů a technologických parametrů.

V praxi existuje nepřeberné množství tvarů výtažků a jednotlivé literární zdroje se v rozdělení tažení více či méně liší. V rámci DP bylo pro lepší přehled použito rozdělení podle tvaru výsledného výtažku a podle metody tažení, tedy:

- a) Rozdělení tažení podle tvaru výsledného výtažku
 - 1) Výtažky mělké/hluboké
 - 2) Výtažky bez ztenčení stěny/se ztenčením stěny
 - 3) Výtažky bez příruby/s přírubou/s širokou přírubou
 - 4) Výtažky rotačně symetrické/čtvercové nebo obdélníkové/nesymetrické
- b) Rozdělení tažení podle metody (způsobu) tažení
 - 1) Konvenční způsoby tažení
 - I. Tažení bez přidržovače/s přidržovačem
 - II. Tažení bez ztenčení stěny/se ztenčením stěny
 - III. Tažení jednooperační/víceoperační/postupové
 - IV. Zpětné tažení
 - V. Zužování
 - VI. Rozšiřování
 - VII. Lemování (protahování)
 - 2) Nekonvenční způsoby tažení
 - I. Tažení vysokými rychlostmi (explozivní tažení)
 - II. Tažení nepevnými nástroji
 - 1. Metoda Guerin
 - 2. Metoda Marform
 - 3. Metoda Hydroform
 - 4. Hydromechanické tažení
 - 5. Ostatní
 - III. Tažení v superplastickém stavu
 - IV. Kovotlačení
 - V. Ostatní

Na základě výše uvedeného lze zadaný díl charakterizovat jako hluboký, tvarově složitý výtažek s přírubou a konstantní tloušťkou stěny. Níže uvedené podkapitoly proto budou zaměřeny právě na takové typy výtažků a na další relevantní informace pro návrh řešení.

¹ Technologie, při které nedochází k výrazné změně tloušťky polotovaru. Výjimku tvoří tzv. tažení se ztenčením stěny.

² Souhrnně je nazýváno tažidlem.

3.1 Materiály polotovarů a jejich vhodnost pro tažení [10], [15], [17], [18], [19], [20]

Výběr materiálu je podstatný pro celkový návrh tvářecí technologie. Má přímý vliv na:

- volbu metody (způsobu) tažení,
- počet tažných operací,
- volbu/konstrukci nástroje (tažidla),
- mezioperační žíhání (pokud je třeba),
- volbu stroje,
- technologické parametry (rychlost tváření, maziva, ...).

Vhodnost materiálu ke tváření ovlivňuje především:

- chemické složení,
- mikrostruktura (typ krystalické mřížky),
- makrostruktura (tvar a velikost zrn),
- vady (dislokace).

a z nich plynoucí mechanické vlastnosti, které by měly být homogenní a izotropní v celém objemu materiálu.

Z hlediska mechanických vlastností jsou nejpodstatnější především:

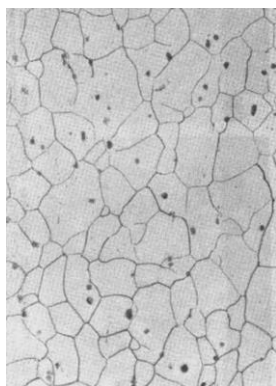
- mez kluzu R_e ,
- mez pevnosti R_m ,
- tažnost A ,
- kontrakce Z ,
- modul pružnosti v tahu E ,
- koeficient plošné r a normálové anizotropie n .

3.1.1 Korozivzdorné oceli [10], [9], [21], [22], [1], [12], [23], [24], [19], [20], [25]

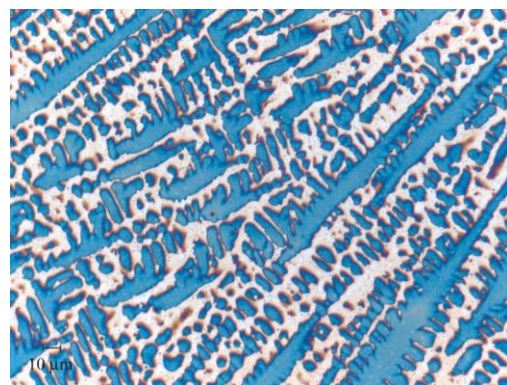
Do této kategorie se řadí oceli s obsahem max. 1,2 % uhlíku a min. 10,5 % chromu. Tyto oceli lze rozdělit podle hlavních legujících prvků na chrom-niklové (Cr-Ni), molybdenové (Mo) a manganové (Mn). Další možností rozdělení je na základě mikrostruktury a to na feritické (viz obr. 10), martenzitické (viz obr. 9), nebo austenitické (viz obr. 11).



Obr. 9 Struktura martenzitické korozivzdorné oceli [24]



Obr. 10 Struktura feritické korozivzdorné oceli [24]

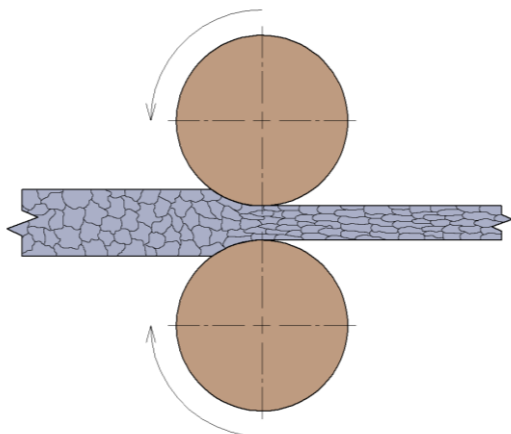


Obr. 11 Struktura austenitické korozivzdorné oceli [24]

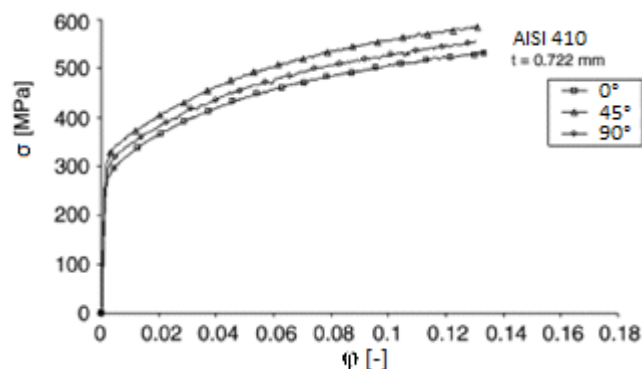
Klasické chromniklové korozivzdorné oceli jsou dobře tažitelné, ale jejich nevýhodou je vysoká míra zpevňování, což s sebou nese požadavek častějšího žíhání v případech víceoperačního tažení, vyšší tažnou sílu a s tím související robustnější konstrukci tažidla a

vyšší přidržovací tlak od přidržovače. Pro první tahy by měla být redukce kolem 40 % a pro druhé a další tahy 20 – 25 %.

U všech materiálů je nutno vzít v potaz, že výše uvedené mechanické vlastnosti nemusí být konstantní v celém objemu a směrech tvářeného materiálu. Projevuje se tzv. anizotropie. „Anizotropie je vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru.“ [22] V tomto případě se jedná o mechanické vlastnosti, které jsou vlivem předchozího zpracování (většinou vlivem přechozího válcování za studena) různé v jednotlivých směrech zatěžování (viz obr. 13). To je způsobeno především deformovanými zrny, která jsou prodloužená ve směru válcování (viz obr. 12).

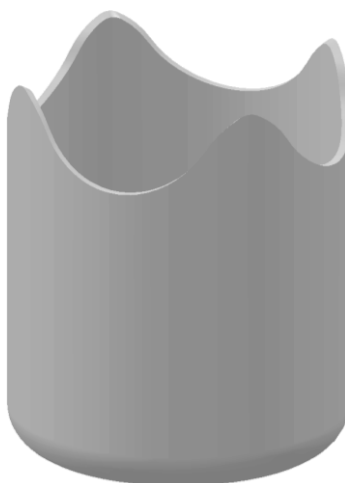


Obr. 12 Deformace zrn materiálu v důsledku válcování [1], [12]



Obr. 13 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci anizotropního materiálu zatěžovaného pod úhlem 0°, 45° a 90° [1], [23]

Anizotropie se při tažení nejčastěji projevuje tzv. cípatostí výtažku (viz obr. 14)



Obr. 14 Příklad cípatého výtažku

Možností, jak lze anizotropii odstranit je tepelné zpracování (nejčastěji rekrystalizační žíhání), kde se deformovaná zrna rozdělí a vytvoří tak homogenní strukturu s izotropními vlastnostmi³.

³ Ve skutečnosti nelze téměř nikdy dosáhnout dokonalých izotropních vlastností.

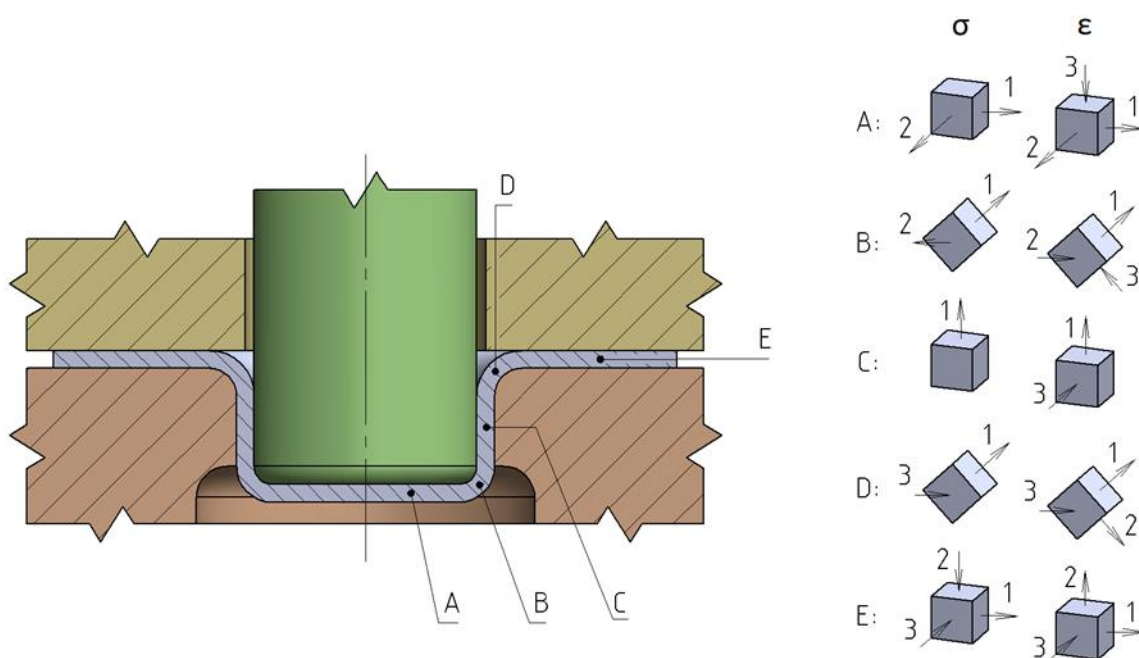
3.2 Napjatost a deformace [12], [10], [15]

Zkoumání a analyzování napjatosti a deformace je podstatné pro získání celkového přehledu chování materiálu a analýzu rizik souvisejících s tažením, jako je například riziko ztenčení stěny a vzniku trhliny, či riziko vzniku zvlnění.

Tažení tvarově složitých součástí je z hlediska analytického popisu napjatosti a deformace v mnohých případech příliš složité, či nemožné. Proto se tu uplatňuje využití experimentálního zkoumání na dané konkrétní geometrii výtažku (např. nanesením deformační sítě a zkoumáním deformace kružnic), či za použití počítačové techniky a numerických metod (především metodu konečných prvků), kde lze pro daný konkrétní tvar výtažku získat schémata napjatosti a deformace pro požadovanou oblast výtažku.

Další možností, jak získat alespoň částečnou představu o schématu napjatosti spočívá v rozdělení výtažku na rohy a rovné části, pro které existuje dostatečný analytický či experimentální popis, a kde se předpokládá, že ke skutečnému tažení dochází pouze v rozích výtažku a čím dále jsme od rohu, tím více se schéma napjatosti podobá prostému ohýbání.

Pro rohy výtažku lze tedy usuzovat podobnou napjatost jako u válcového výtažku (viz obr. 15).



Obr. 15 Schéma napjatosti a deformace při tažení válcového výtažku s přídržovačem [12]

Z hlediska napjatosti a deformace lze válcový výtažek rozdělit na níže popsané úseky.

A. Oblast dna výtažku

V této oblasti dochází k rovinné tahové napjatosti a k prostorové deformaci se zápornou složkou deformace v oblasti tloušťky materiálu, z toho důvodu zde vzniká riziko ztenčení stěny dna výtažku, což je problém především při víceoperačním tažení.

B. Oblast zaoblení u dna

Tato oblast je charakteristická především nehomogenní prostorovou napjatostí a deformací. Jedná se o místo, které je nejvíce náchylné na ztenčení stěny a z toho

důvodu zde jako první dochází ke vzniku trhlin či v extrémním případě k odtržení dna.

C. Válcová oblast

V této oblasti se nachází pouze jednoosá tahová napjatost a rovinná deformace.

D. Oblast zaoblení u příruby

Podobně jako v oblasti zaoblení u příruby se i tady nachází nehomogenní prostorová napjatost s výraznou tahovou radiální složkou a tlakovou radiální složkou a deformace.

E. Oblast příruby

Vlivem působení tažníku se v oblasti příruby nachází prostorová napjatost a deformace, kde s přibližováním materiálu k oblasti horního přechodu roste radiální a tangenciální napjatost. Především tangenciální napjatost může být při tažení bez použití přidržovače důvodem ztráty stability a vzniku tzv. zvlnění.

3.3 Součinitel tažení a počet tažných operací [12], [15], [26], [14], [10], [27], [28], [19], [20]

Součinitel tažení m vyjadřuje poměr průměrů výtažků nebo výtažku a polotovaru získaný pro danou tažnou operaci, aniž by došlo vlivem napětí u dna výtažku k jeho odtržení (viz rovnice 3.1).

$$m = \frac{d}{D} < 1 \quad [-] \quad (3.1)$$

kde: d – průměr tažníku, vnitřní průměr výtažku [mm],
 D – výchozí průměr přístřihu plechu [mm].

V některých zemích se lze setkat s výrazem koeficient tažení K , který je převrácenou hodnotou součinitele tažení (viz rovnice 3.2), či redukcí R (viz rovnice 3.3).

$$K = m^{-1} = \frac{D}{d} > 1 \quad [-] \quad (3.2)$$

$$R = \frac{D - d}{D} \cdot 100 = (1 - m) \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

Součinitel tažení má uplatnění především u jednoduchých rotačně-symetrických součástí, které jsou relativně snadno analyticky popsitelné. Pomocí něj se stanovuje potřebný počet operací (či mezioperačních žíhání), potřebných pro dosažení požadovaného tvaru výtažku (požadované redukce).

Pro víceoperační tažení se stanovuje tzv. celkový součinitel tažení m_c , který je dán součinem součinitelů tažení v jednotlivých operacích, tedy:

$$m_c = \prod_{i=1}^n m_i = \prod_{i=1}^n \frac{d_i}{d_{i-1}} \quad [-] \quad (3.4)$$

kde: m_i – součinitel tažení i -té tažné operace [-],
 $d_0 = D$ – výchozí průměr přístřihu plechu [mm],
 d_i – průměr, či jiný ekvivalentní rozměr výtažku po i -té tažné operaci [mm].

Pro určení počtu tažných operací je nutno znát součinitel tažení taženého materiálu a na základě něho stanovovat počet tažných operací a to tak, že součinitel tažení pro danou operaci musí být vyšší, než kritický součinitel tažení m_k , který je experimentálně získaný.

U tvarově složitých výtažků se součinitel tažení stanovuje pro místo s nejvyšší křivostí a poměrnou hloubkou výtažku, je dán vztahem:

$$m = \frac{2 \cdot R_b}{D_{0R}} [-] \quad (3.5)$$

kde: R_b – poloměr zaoblení v rohu výtažku (viz obr. 16) [mm],
 D_{0R} – redukovaný průměr přístřihu plechu [mm].

$$D_{0R} = 2 \cdot \sqrt{R_b^2 + 2 \cdot R_b \cdot H - 0,85 \cdot R_b \cdot R_d - 0,14 \cdot R_d^2} \text{ [mm]} \quad (3.6)$$

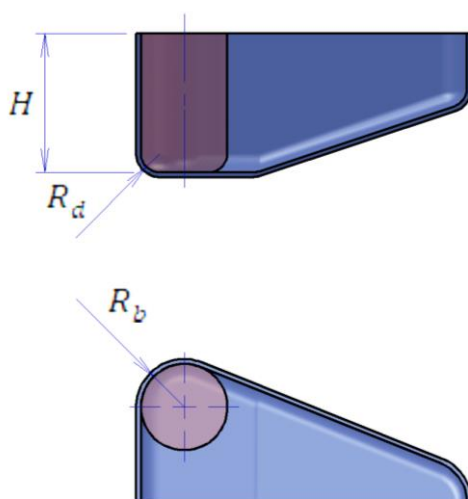
kde: R_d – poloměr zaoblení u dna výtažku (viz obr. 16) [mm],
 H – výška výtažku [mm].

Forejt [26] a Bareš [27] uvádí níže uvedený vztah pro předběžné určení počtu tahů g . Ten je sice odvozen pro tažení rotačně-symetrických součástí, ale za předpokladu použití v rozích výtažku a dosažení součinitelů tažení pro nerotační výtažky, pak teoreticky lze tento vztah použít i v případě tažení zadané součásti.

$$g = 1 + \frac{\ln(d_n) - \ln(m_1 \cdot D_{0R})}{\ln(m_s)} [-] \quad (3.7)$$

kde: d_n – průměr výtažku v n -té/konečné operaci [mm],
 m_1 – Součinitel tažení v 1. tažné operaci [-],
 m_s – střední součinitel tažení [-].

Norma ČSN 22 7301 doporučuje volit střední součinitel tažení m_s v rozmezí 0,75 až 0,85. [28]



Obr. 16 Tvarově složitý výtažek [15]

Tišnovský [10] oproti tomu uvádí maximální výšku výtažku H v závislosti na poloměru zaoblení rohů výtažku R_b podle tabulky níže.

Tab. 1 Závislost maximální výšky na poloměru zaoblení rohů výtažku v první tažné operaci [10]

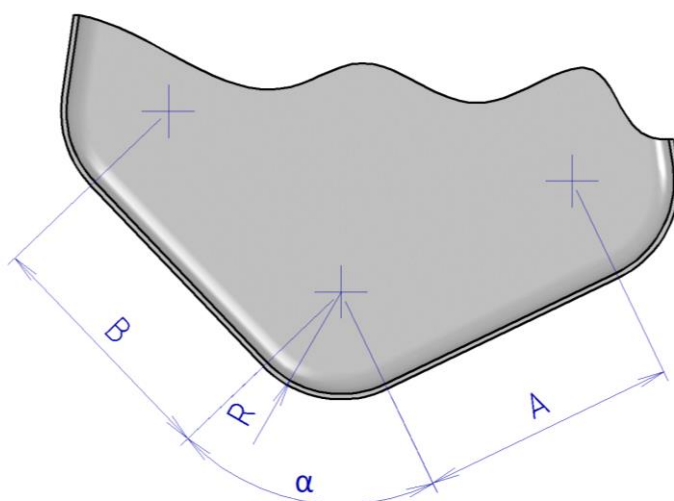
Poloměr zaoblení rohů výtažku R_b [mm]	Maximální výška výtažku H [mm]
≤ 5	$8 \cdot R_b$
(5; 10)	$7 \cdot R_b$
(10; 13)	$6 \cdot R_b$
(13; 19)	$5 \cdot R_b$
> 19	$4 \cdot R_b$

Pozn.: U běžných materiálů se hloubka výtažku H snižuje o $1 \cdot R_b$.

Pro určení kritického součinitele tažení u nerotačních výtažků, kde úhel rohu $\alpha \neq \{90^\circ; 180^\circ\}$, pro první tah, udává Bareš [27] následující postup:

a) Určení průměrného součinitele tažení pro tažení oválné nádoby \overline{m}_{180°

Podle obrázku 17 se nejprve určí vzdálenost středu řešeného rohu ke středům přilehlých rohů.



Obr. 17 Vzdálenost mezi středy rohů výtažku [27]

Následně se podle tabulky 2 a poloměru zaoblení řešeného rohu R_b zvolí součinitel tažení pro stranu A $m_{180^\circ A}$ a pro stranu B $m_{180^\circ B}$ a jejich hodnoty se zprůměrují, tedy:

$$\overline{m}_{180^\circ} = \frac{m_{180^\circ A} + m_{180^\circ B}}{2} \quad [-] \quad (3.8)$$

Tab. 2 Hodnoty součinitelů tažení m_{180° pro tažení oválných nádob [27]

Délka A, B	Poměrná tloušťka $\frac{t}{D_{0R}} \cdot 100$ [%]					
	(0, 1; 0, 3)	(0, 3; 0, 6)	(0, 6; 1, 0)	(1, 0; 1, 5)	(1, 5; 2, 0)	(2, 0; ∞)
0	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50
R_b	0,59	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49
$2 \cdot R_b$	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48
$3 \cdot R_b$	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46
$4 \cdot R_b$	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45
$5 \cdot R_b$	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44

$6 \cdot R_b$	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,43
$7 \cdot R_b$	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42
$8 \cdot R_b$	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40
$9 \cdot R_b$	0,49	0,47	0,45	0,43	0,41	0,39
$10 \cdot R_b$	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38

b) Určení průměrného součinitele tažení pro tažení čtvercové nádoby \overline{m}_{90°

V tomto bodě se postupuje stejně jako v bodě a), s tím rozdílem, že se průměrují hodnoty součinitelů tažení pro tažení čtvercové nádoby $m_{90^\circ A}$ a $m_{90^\circ B}$ podle tabulky 3.

$$\overline{m}_{90^\circ} = \frac{m_{90^\circ A} + m_{90^\circ B}}{2} [-] \quad (3.9)$$

Tab. 3 Hodnoty součinitele tažení m_{90° pro tažení čtvercových nádob [27]

Délka A, B	Poměrná tloušťka $\frac{t}{D_{0R}} \cdot 100$ [%]					
	$\langle 0, 1; 0, 3 \rangle$	$\langle 0, 3; 0, 6 \rangle$	$\langle 0, 6; 1, 0 \rangle$	$\langle 1, 0; 1, 5 \rangle$	$\langle 1, 5; 2, 0 \rangle$	$\langle 2, 0; \infty \rangle$
0	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50
R_b	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48
$2 \cdot R_b$	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45
$3 \cdot R_b$	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,43
$4 \cdot R_b$	0,50	0,48	0,46	0,47	0,42	0,40
$5 \cdot R_b$	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38
$6 \cdot R_b$	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,36
$7 \cdot R_b$	0,43	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33
$8 \cdot R_b$	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31
$9 \cdot R_b$	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28
$10 \cdot R_b$	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28	0,26

c) Určení součinitele tažení pro požadovaný úhel α

Za předpokladu lineární závislosti součinitelů tažení na úhlu α , lze tak získat požadovaný součinitel tažení m_α pro požadovaný úhel α pro první operaci pomocí interpolace součinitelů tažení \overline{m}_{180° a \overline{m}_{90° přímkou, tedy:

$$m_\alpha = \frac{\overline{m}_{180^\circ} - \overline{m}_{90^\circ}}{90} \cdot \alpha + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ} - \overline{m}_{180^\circ} [-] \quad (3.10)$$

Pro určení kritického součinitele tažení u nerotačních výtažků, kde úhel rohu $\alpha \neq \{90^\circ; 180^\circ\}$, pro druhý a další tah, udává Bareš [27] následující postup, který je podobný jako v případě prvního tahu s tím rozdílem, že součinitelé tažení z tabulky jsou korigovány.

Myšlenka korekce spočívá v tom, že poměr P_1 součinitele tažení hranatého výtažku m_{h1} ku součiniteli tažení válcového výtažku m_{r1} je v jednotlivých tazích stejný, tedy:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n = \frac{m_{h1}}{m_{r1}} = \frac{m_{h2}}{m_{r2}} = \dots = \frac{m_{hn}}{m_{rn}} [-] \quad (3.11)$$

Jelikož má zadaná součást přírubu, je vhodné za součinitel tažení válcového výtažku dosazovat hodnoty součinitele tažení pro rotační výtažky s přírubou (viz tab. 4)

Tab. 4 Koeficienty tažení pro válcové výtažky s přírubou [27]

Tah	Poměrná tloušťka $\frac{t}{D_{0R}} \cdot 100$ [%]				
	$\langle 0, 15; 0, 3 \rangle$	$\langle 0, 3; 0, 6 \rangle$	$\langle 0, 6; 1, 0 \rangle$	$\langle 1, 0; 1, 5 \rangle$	$\langle 1, 5; 2, 0 \rangle$
2.	0,80	0,78	0,76	0,75	0,73
3.	0,82	0,80	0,79	0,78	0,75
4.	0,84	0,83	0,82	0,80	0,78
5.	0,86	0,85	0,84	0,82	0,80

3.4 Stanovení poloměru zaoblení funkční hrany tažníku a tažnice [10], [15], [29]

Pro výtažky se poloměr funkční hrany tažnice R_{te} (viz obr. 18) vypočte na základě empirického vztahu:

$$R_{te} = 0,8 \cdot \sqrt{(D_0 - d_1) \cdot t} \text{ [mm]} \quad (3.12)$$

kde: t – tloušťka přístřihu [mm].

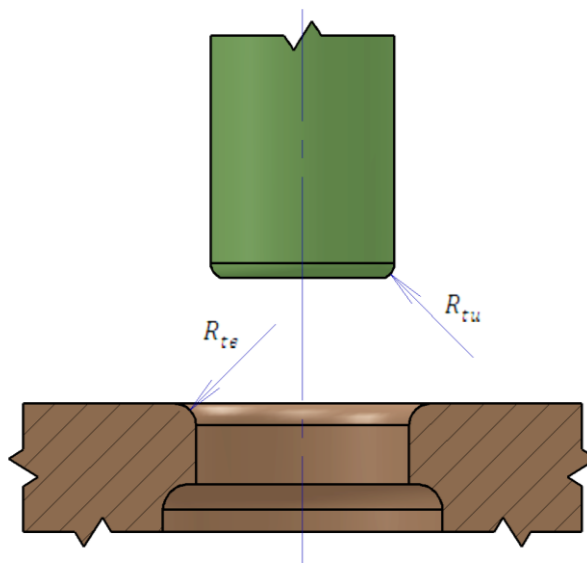
Poloměr zaoblení funkční hrany tažníku R_{tu} (viz obr. 18) je stejný jako tažný poloměr, tedy $R_{tu} = R_{te}$ a jeho velikost je do předposledního tahu neměnná. Minimální hodnoty poloměru zaoblení funkční hrany tažníku jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 5 Minimální hodnoty poloměru zaoblení funkční hrany tažníku [15]

Průměr výtažku d [mm]	Minimální poloměr zaoblení funkční hrany tažníku R_{tu} [mm]
$\langle 10; 100 \rangle$	$(3 - 4) \cdot t$
$\langle 100; 200 \rangle$	$(4 - 5) \cdot t$
≥ 200	$(5 - 7) \cdot t$

V případě požadavku na nižší poloměr zaoblení, než je uveden v tabulce výše je nutno zařadit tzv. kalibraci, při které se nemění rozměry výtažku, ale pouze poloměr zaoblení u dna výtažku.

Norma ČSN 22 7303 [29] doporučuje tažný poloměr R_{te} a poloměr funkční hrany tažníku R_{tu} volit v intervalu $\langle 6; 10 \rangle \cdot t$. Pro první tah je doporučeno volit vyšší hodnoty $(8 - 10)$ a pro další tahy $(6 - 8)$.



Obr. 18 Poloměr zaoblení funkční hrany tažníku a tažnice

3.5 Návrh přístřihu [10], [15], [30]

Návrh přístřihu hraje podstatnou roli během návrhové fáze tažení. Především z ekonomického hlediska je vhodné, aby přístřih plechu nebyl zbytečně rozměrný z důvodu minimalizace odpadu.

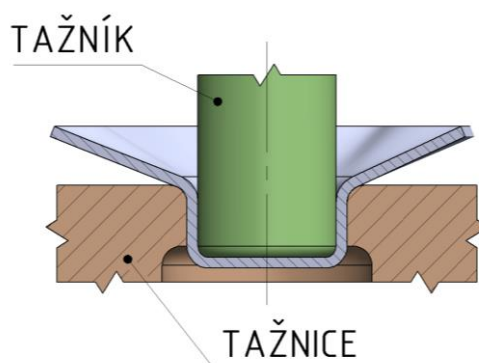
Základní princip návrhu polotovaru vychází ze zákona o zachování objemu. Tedy objem výtažku musí být roven objemu polotovaru. Za předpokladu, že tažení bude probíhat bez ztenčení stěny lze zákon zachování objemu zjednodušit na zákon zachování ploch. Tedy velikost plochy výtažku je rovna velikosti plochy polotovaru. Tato myšlenka je reálně snadno aplikovatelná při tažení rotačních výtažků. U tažení nerotačních a tvarově složitých výtažků je její reálná aplikace nemožná v důsledku vlivu mnoha dalších faktorů, u těchto typů tažení. Z toho důvodu ji lze použít maximálně pro kontrolu.

U tvarově složitých součástí je analytické určení tvaru polotovaru již velmi komplikované a v praxi nepoužitelné. Jistou možností je využití např. metody rovinných řezů, jejíž princip spočívá v pomyslném nařezání výsledného tvaru výtažku a následného rozvinutí těchto řezů. Tato metoda ovšem nezohledňuje napjatostní a deformační stavy daného výtažku, proto je její použití v praxi omezené. Nejčastěji se využívá výpočetní techniky a metody konečných prvků pomocí nichž lze získat tvar výchozího výtažku s určitou přesností⁴.

3.6 Použití přidržovače [10], [15], [14], [31]

Primárním úkolem přidržovače je zabránit ztrátě vnitřní stability taženého materiálu a s tím souvisejícího zvlnění (viz obr. 19). Sekundárně lze využít také pro usměrnění toku materiálu v tažidle například právě při tažení tvarově složitých výtažků to změnou přitlačného tlaku přidržovače.

⁴ Přesnost je ovlivněna především kvantitou a kvalitou vstupních informací (materiálové vlastnosti) a dále velikostí výpočetní sítě a konvergenčním kritériem.



Obr. 19 Příklad tažení bez přidržovače s výrazným zvlněním [14]

Volba tlaku přidržovače závisí především na taženém materiálu. Doporučené tlaky pro jednotlivé materiály udává tabulka níže.

Tab. 6 Doporučené tlaky přidržovače [15]

Tvářený materiál	Tlak přidržovače [MPa]
Hlubokotažná ocel	2,0 – 3,0
Nerezová ocel	2,0 – 5,0
Měď	1,2 – 2,0
Mosaz	1,5 – 2,0
Hliník	0,8 – 1,2

Přidržovač většinou není třeba u mělkého tažení tlustých plechů. Pro určení, zda je potřeba, či není použit přidržovač, lze použít níže uvedený empirický vztah, udávající maximální hodnotu redukce R_{max} , kdy lze ještě táhnout bez použití přidržovače.

$$R_{max} = 50 \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt[3]{D}} + 100 \cdot (1 - c) \quad [\%] \quad (3.13)$$

kde: c – konstanta závislá na druhu taženého materiálu⁵ [-]

Norma ČSN 22 7301 [31] udává následující vztah pro určení potřeby tažení s přidržovačem:

$$50 \cdot \left(w - \frac{\sqrt{t}}{\sqrt[3]{D}} \right) \geq \frac{100 \cdot d_n}{D} \quad (3.14)$$

kde: w – konstanta závislá na druhu taženého materiálu⁶ [-]

V případě platnosti výše uvedené nerovnosti je nutno táhnout s přidržovačem. Při tažení tenkých plechů (do 0,50 mm) je potřeba použít přidržovač vždy. [31]

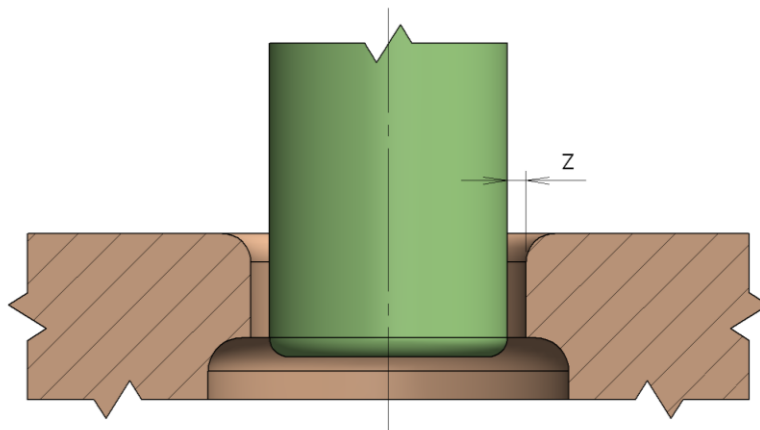
⁵ Al, Zn = 1; Cu, Cu slitiny = 0,975; ocel = 0,950.

⁶ Ocel = 1,9; mosaz = 1,92; Al, Zn = 2.

3.7 Tažná mezera a vůle [10], [15], [29]

Z důvodu proměnné tloušťky plechu během tažení, způsobené redukcí a tolerancí tloušťky plechu, je nutno mezi tažníkem a tažnicí zajistit vůli v (viz rovnice 3.15), resp. mezeru z (viz obr. 20) takovou, aby nedocházelo k zadírání a zvyšování tažné síly a s tím i spojeného rizika odtržení dna.

$$v = 2 \cdot z \text{ [mm]} \quad (3.15)$$



Obr. 20 Vůle mezi tažníkem a tažnicí [15]

Pro nerotační výtažky Dvořák [15] a Tišnovský [10] doporučují volit tažnou mezeru:

$$z = 1,10 \cdot t \text{ [mm]} \quad (3.16)$$

V rozích výtažku je doporučeno volit tažnou mezeru vyšší, než v rovných úsecích a to z důvodu přirozeného zvyšování tloušťky taženého materiálu v těchto oblastech, což s sebou nese vyšší zpevnění a tím i vyšší tažnou sílu.

Vyšší tažnou mezeru je také doporučeno volit u víceoperačního tažení, respektive v posledním tahu, jelikož při každé tažné operaci se tloušťka materiálu nepatrně zvyšuje.

Norma ČSN 22 7303 [29] doporučuje mezeru pro první a další tahy pro rovné úseky:

$$z = \langle 1,15; 1,30 \rangle \cdot t \text{ [mm]} \quad (3.17)$$

A pro rohy:

$$z = \langle 1,30; 1,40 \rangle \cdot t \text{ [mm]} \quad (3.18)$$

V případě komplikovaných tvarů lze tažnou mezeru v rovných úsecích a v rozích volit stejnou, tedy:

$$z = 1,30 \cdot t \text{ [mm]} \quad (3.19)$$

3.8 Tažná rychlost, síla a práce [10], [12], [15], [32]

Maximální tažnou rychlost v_t ovlivňuje především použitý materiál výtažku. Při vyšších rychlostech, než jsou doporučené, vzniká riziko porušení výtažku.

To může být problém především u starších lisů, kde rychlost nelze regulovat. U klikových nebo výstředníkových lisů je třeba nastavit excentricitu tak, aby maximální rychlost během pracovního zdvihu nebyla vyšší, než je pro tažený materiál doporučeno.

Doporučené rychlosti tažení podle Tišnovského [10] jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 7 Doporučené tažné rychlosti podle Tišnovského [10]

Tažený materiál	Tažná rychlost v_t [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Austenitická korozivzdorná ocel	7
Nelegovaná ocel	17
Hliník a jeho slitiny	25
Měď a její slitiny	66

Zvláštním případem je tažení vysokými rychlostmi (explozivní tažení), kde se využívá vysoké rychlosti tlakové vlny pro tažení tvarově složitých výtažků.

Pro výpočet maximální tažné síly F_{max} se vychází z předpokladu, že maximální tažná síla, při které již dojde ke vzniku porušení u dna je u rotačního výtažku:

$$F_{max} = S_m \cdot Rm \text{ [N]} \quad (3.20)$$

$$F_{max} = \pi \cdot d_s \cdot t \cdot Rm \text{ [N]}$$

kde: S_m – plocha mezikruží válcového výtažku kolmá na směr působící tažné síly [mm^2],

Rm – pevnost taženého materiálu [MPa] (viz příloha 2),

d_s – střední průměr výtažku [mm].

Skutečná tažná síla F_{skut} tak musí být nižší, než výše uvedená. Pro výpočet skutečné tažné síly se běžně využívá empirických vztahů, například:

$$F_{skut} = F_{max} \cdot \left(\frac{D}{d_s} - 0,7 \right) \text{ [N]} \quad (3.21)$$

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že jeho použití je omezeno poměrem D/d_s , který musí být menší než 1,7. V opačném případě by $F_{skut} \geq F_{max}$, tedy došlo by odtržení dna výtažku.

V případě tažení pomocí mechanického lisu je nutno výše uvedený vztah vynásobit součinitelem A_F (viz příloha 3), který zohledňuje proměnlivost síly lisu během pracovního zdvihu, tedy:

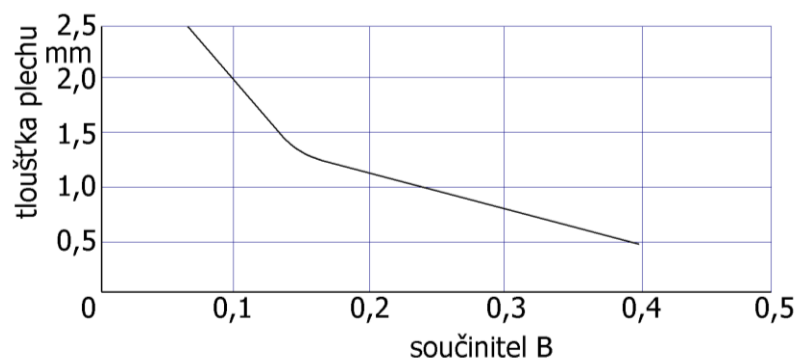
$$F_{mlis} = F_{skut} \cdot A_F \text{ [N]} \quad (3.22)$$

kde: F_{mlis} – tažná síla v případě použití mechanického lisu [N].

V případě použití pružinového či pneumatického přidržovače, je nutno vypočtenou sílu navýšit o sílu potřebnou ke stlačení přidržovače F_p , tedy:

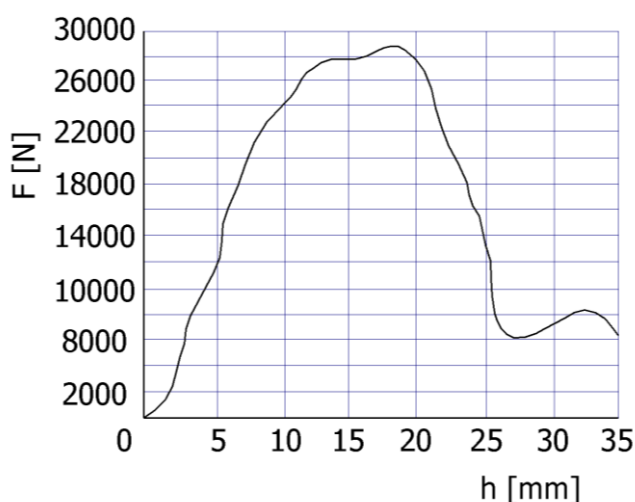
$$F_p = F_{skut} \cdot B_F \text{ [N]} \quad (3.23)$$

kde: B_F – součinitel (viz obr. 21) [-].



Obr. 21 Graf pro určení součinitele B_F [10]

Příklad průběhu tažné síly v závislosti na okamžité hloubce tažení válcového výtažku je uveden v obrázku níže.



Obr. 22 Příklad průběhu tažné síly v závislosti na okamžité hloubce během tažení válcového výtažku [12]

U nerotačních výtažků se opět vychází z předpokladu, že tažná síla nemůže být vyšší, než taková, která by způsobila odtržení dna výtažku. Celková tažná síla F_c je dána součtem tažné síly pro rohy (4 rohy, 90°) F_1 a rovné stěny výtažku F_2 , tedy:

$$F_1 = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 \text{ [N]} \quad (3.24)$$

kde: C_1 - konstanta⁷ [-].

$$F_2 = L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2 \text{ [N]} \quad (3.25)$$

kde: L – součet délek rovných stěn výtažku [mm],
 C_2 – konstanta⁸ [-].

$$F_c = F_1 + F_2 \text{ [N]} \quad (3.26)$$

⁷ Pro velmi mělké výtažky $C_1 = 0,5$, pro výtažky, jejichž hloubka je vyšší, než $(5 - 6) R$, $C_1 = 2$.

⁸ Pro nulový přidržovací tlak, správný tvar tažné hrany a dostatečnou vůli $C_2 = 0,2$, pro normální tlak přidržovače, správný tvar tažné hrany a dostatečnou vůli $C_2 = 0,3$.

Tažná práce A_t je pak dána plochou pod křivkou tažné síly, matematicky:

$$A_t = \int_{h_0}^{h_1} F_t \cdot dh \quad [J] \quad (3.27)$$

kde: F_t – okamžitá tažná síla [N],
 h_0 – počáteční hloubka tažení [m],
 h_1 – konečná hloubka tažení [m].

Vzhledem k tomu, že dopředu nelze přesně určit závislost tažné síly na hloubce, využívá se přibližný výpočet tažené síly, pak tažná práce:

$$A_t \approx F_c \cdot C_3 \cdot h_1 \quad [J] \quad (3.28)$$

kde: C_3 – konstanta⁹ [-]

3.9 Stroje a nástroje pro konvenční tažení [10], [29], [30], [33], [15], [34], [35]

Na zajištění dobré ekonomičnosti výroby a jakosti výsledných výtažků má významný vliv volba/konstrukce tvářecích strojů a jejich nástrojů. Tuto volbu ovlivňuje obsáhlé množství technických a ekonomických parametrů. Např.:

- velikost výrobní série,
- tvar a rozměry výtažku,
- materiál výtažku a jeho vlastnosti,
- způsob (metoda) tažení,
- požadovaná tažná síla/práce a rychlost tažení,
- požadovaný počet a druh operací,
- stávající strojový park, respektive návratnost investice do nového stroje/ů a nástroje/ů,
- atd.

Pro dosažení bezporuchového provozu tažidel ať již jednoduchých či sdružených je závislé především na vhodném způsobu odstraňování výtažků, správném přidržení přístřihu a správně zvoleném tlaku přidržovače. Konstrukce stíračů a vyhazovačů bývá téměř stejná.

Na konstrukci tažidla má velký vliv tažený materiál, míra jeho zpevňování (ovlivňuje robustnost nástroje) a frikční vlastnosti, dále hloubka respektive tvar výtažku. Doporučené materiály tažidla jsou uvedeny v tabulce níže

⁹ Pro tažení bez kalibrace dna $C_3 = 0,66$, pro tažení s kalibrací dna $C_3 = 0,8$.

Tab. 8 Doporučené materiály tažidla podle Tišnovského [10]

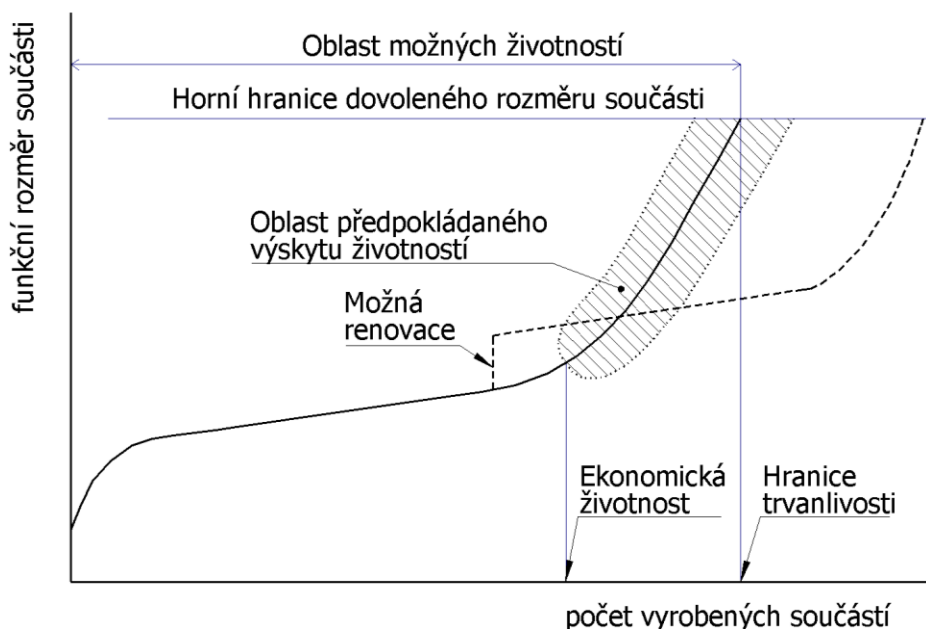
Tažený materiál	Charakteristika geometrie výtažku	Doporučený materiál tažidla
Nerezová ocel	Mělké výtažky	Nástrojová ocel
	-	Chromniklová litina
	Velmi hluboké výtažky	Tvrký bronz
Hliník	Velké výtažky bez požadavku na vysokou kvalitu povrchu	Šedá litina
	-	Nástrojová ocel
	-	Vložky ze slinutého karbidu
	Jednoduché výtažky malé výrobní série	Bukové dřevo
	Jednoduché výtažky malé výrobní série	Plasty

Pro srovnání výše uvedeného Tišnovský uvádí, že při tažení složitého výtažku z nerezové oceli v tažidle z nástrojové oceli bylo vyrobeno 100 výtažků, než byla jejich kvalita vyhodnocena jako nedostatečná. Oproti tomu při použití bronzového tažidla bylo při stejných parametrech vyrobeno 50000 výtažků.

Norma ČSN 22 7303 [29] doporučuje drsnost funkčních částí tažidel $R_a = 0,05$ až $0,2$ v závislosti na velikosti výtažku a požadavcích na kvalitu povrchu.

Problematika funkčního poloměru zaoblení tažníku a tažnice byla probrána v kapitole 3.4.

Důležitým úkonem v průběhu činnosti nástroje je jeho údržba. Nástroje jako i jiné funkční strojí součásti podléhají opotřebení (adhezní, abrazivní, korozní, únavové, atd.). Z toho důvodu je po určité době používání provést renovaci, která prodlouží celkovou životnost daného nástroje (viz obr. 23)



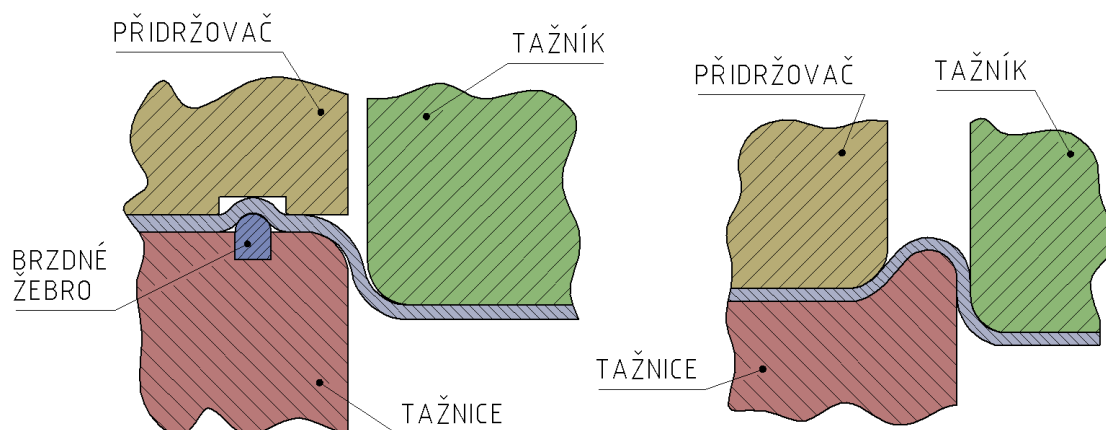
Obr. 23 Křivka opotřebení tvářecího nástroje [33]

Při tažení tvarově složitých výtažků se lze setkat s tzv. brzdými žebry, která se používají pro usměrnění toku materiálu v tažidle při tažení nerotačních a tvarově složitých součástí, kde zabráňují rychlému toku materiálu do rovinných stěn, kde nedochází k takovému odporu jako

v rozích výtažku. Dále je lze využít při tažení kulových a kuželových součástí pro snížení rizika vzniku zvlnění.

Brzdná žebra mohou nabývat různého tvaru a velikostí podle požadavku na brzdny účinek a na zpevnění, které materiál získá při průchodu brzdny žebrem.

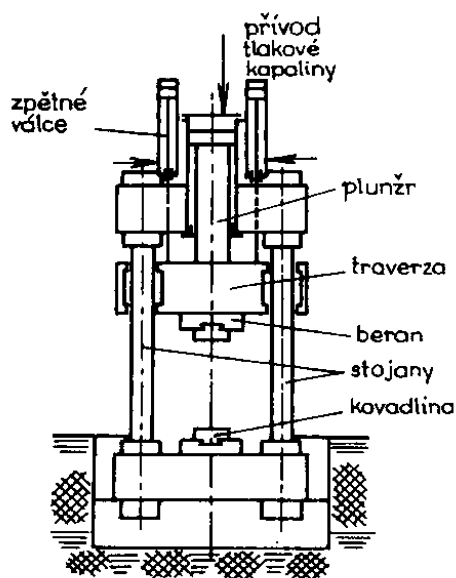
Brzdny žebro může být konstruováno jako součást tažnice, případně jako samostatny díl, jenž se k tažnici připevní např. pájením nebo šroubem (viz obr. 24).



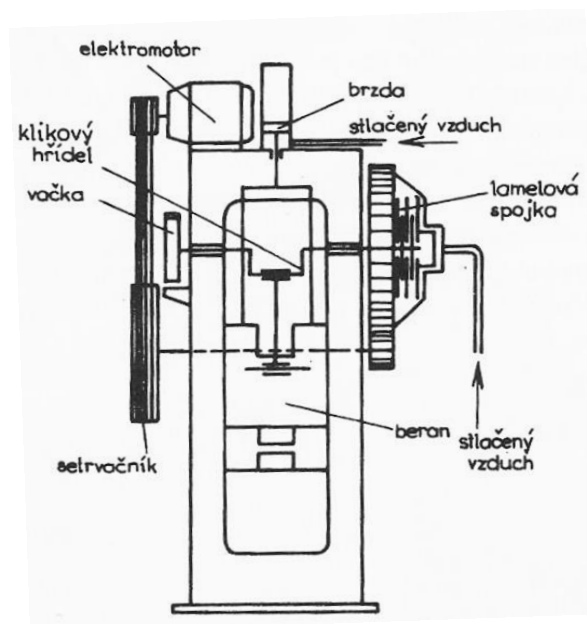
Obr. 24 Příklad konstrukčního řešení brzdny žebor [31]

Jelikož je problematika konstrukčního řešení tažidla velmi obsáhlá, nebude v této práci více rozebírána. Podrobnější informace lze nalézt např. v [10] a [30].

Pro realizaci hlubokého tažení se využívají tvářecí stroje – lisy a to nejčastěji hydraulické (viz obr. 25) nebo klikové (viz obr. 26).



Obr. 25 Schéma hydraulického lisu [34]



Obr. 26 Schéma klikového lisu [34]

Výhodou hydraulických lisů je především konstantní rychlost (obvykle 0 – 25 m/s) a síla beranu lisu během pracovního zdvihu. Oproti klikovým lisům pracují téměř bez vibrací. Velikost zdvihu a rychlost lze snadno regulovat. Nevýhodou oproti klikovým lisům je

například vyšší pořizovací cena, náročnější údržba a z důvodu nižší rychlosti beranu i nižší takt stroje.

Klikové lisy jsou charakteristické proměnnou silou (která dosahuje maxima v dolní úvrati) i rychlostí beranu, která je dána samotnou konstrukcí lisu (klikovým mechanismem). Oproti hydraulickým lisům obsahuje pojistky, které brání přetížení stroje.

3.10 Maziva [10], [15]

Tažení kovů je výrazně ovlivněno třením mezi nástrojem a taženým materiálem z důvodu působení vysokých kontaktních tlaků. Aplikace vhodných maziv je podstatná pro snížení tření, aby tažné síly nedosáhly vysokých hodnot, u kterých by bylo riziko vzniku porušení taženého materiálu. Dále jejich aplikace zabraňuje zadírání a poškrábání výtažku a snižuje opotřebení tažného nástroje.

Důležitým požadavkem na aplikované mazivo je, aby dokonale pokrylo tažnou plochu výtažku a aby vytvořilo souvislý tenký film, který musí odolat vysokým kontaktním tlakům během tažení.

Čistě kapalných maziv se využívá především při lehkém tažení, kde kontaktní tlaky nepřesáhnou hodnotu 600 MPa. Při tažení s vyššími hodnotami kontaktních tlaků než zmíněných 600 MPa se k mazivu přidává tuhá složka (plnidlo), které umožní dokonalé spojení maziva s povrchem materiálu. Obvykle se jako plnidla využívají: grafit, mastek, plavená křída, atd.

Důležitou roli při výběru maziva hraje i jeho následné odstraňování po tažení, neboť s požadavkem na dokonalé spojení maziva s povrchem materiálu se zhoršuje právě jeho následné odstraňování a v souvislosti s tím se prodlužuje výrobní čas i náklady.

Jednotlivé typy používaných maziv jakož i jejich výhody a nevýhody jsou vedeny v tabulce níže.

Tab. 9 Maziva, jejich využití, výhody a nevýhody [10]

Typ maziva	Oblast využití	Výhody	Nevýhody
Lanolín¹⁰/Lůj	-	Lepší viskózní vlastnosti než minerální oleje i při zvýšené povrchové teplotě	Nevhodné pro velmi těžké a hluboké tahy
Hypoidní¹¹	-	-	-
Mýdlo¹²	Oceli, mědi a jejich slitin	Přilnavost k povrchu při smykovém zatížení ¹³	-
Grafit/Mazivo s grafitem	-	Vhodné pro nejobtížnější tažení za vysokých teplot a tlaků	Obtížné odstraňování po dokončení tažení
Řepkový olej	Oceli, mědi a jejich slitin	-	Pouze pro lehké tahy
Parafín	Křemíkové oceli	-	-

¹⁰ Tuk získaný z výluhů při praní ovčí vlny.

¹¹ Směsi minerálních olejů + sloučeniny obsahující síru a chlór.

¹² Podle pracovní teploty se volí tuhá, polotuhá, nebo tekutá mýdla.

¹³ Platí pro tuhá mýdla.

Řepkový olej + běloba olovnatá + sirný květ	Nerezové oceli	Vhodné i pro vyšší redukce	-
Hovězí lůj/Ricinový olej	Nikl a jeho slitiny	-	-
Petrolej	Hliník	-	Pouze pro lehké tahy
Vazelína/Řepkový olej/Olejová směs	Hliník	Vhodné i pro těžší tahy	-

3.11 Technologičnost [10], [27]

Tažení patří mezi složitější technologické operace a to především u tažení tvarově složitých dílů, kde hraje roli velké množství parametrů takového tažení a to především materiálové, konstrukční, technologické.

Jak již bylo zmíněno v kapitolách výše, mezi materiálové faktory se řadí především tažnost, mez kluzu, pevnost, anizotropie a frikční vlastnosti. Z toho důvodu a pokud to lze, je vhodné dávat přednost dobře tvařitelné hlubokotažné oceli a nevytvrditelným hliníkovým slitinám a mědi.

Z hlediska konstrukčních parametrů jsou nejvhodnější rotačně symetrické válcové výtažky bez nebo s malou přírubou. V případě nerotačních nebo tvarově složitých výtažků je vhodné co největší zaoblení rohů výtažků a stěny navrhnout pokud možno rovné, bez sklonu. Poloměr zaoblení u dna by neměl být přehnaně velký z důvodu malé přidržovací plochy v počátku tažení a s tím rostoucím rizikem vzniku zvlnění.

Z hlediska technologického je třeba navrhnout optimální výrobní postup s požadavkem na minimální počet tažných operací, optimální návrh polotovaru a volba vhodných strojů a nástrojů pro dosažení požadované jakosti výtažku při dané velikosti výrobní série. V praxi bývá výroba limitována strojovým parkem, kterému je potřeba se podřídit.

Dále je potřeba brát v potaz, že technologie hlubokého tažení má svá omezení z hlediska dosažitelné přesnosti a to především vlivem nechtěného ztenčení tloušťky stěn a to především při vysoké redukci. Z toho důvodu je doporučeno tloušťku stěn výtažku ponechat na výkrese bez tolerance. Dále vlivem tažné mezery jsou stěny mírně kuželové (především u nižších výtažků) a vyšší drsností povrchu, která se projevuje především v oblastech s vyšším přetvořením.

Důležité u výtažků je analyzovat a pokud to lze i předcházet vzniku možných vad a to především:

- utržení dna,
- ztráta stability (zvlnění),
- mikrotrhliny a zdrsňení povrchu v zaoblení – způsobeno výraznou Lüdersovou deformací,
- adhézní poškození – způsobeno zadíráním taženého materiálu v důsledku malé tažné mezery/vůle nebo z důvodu absence maziva,
- cípatost – způsobeno anizotropií – nutno používat vyžíhaný polotovar,
- odpružení – materiálová vlastnost – možnost eliminace tzv. kalibrací.

Výše uvedený výčet je jen malým množstvím věcí, které je při analýze technologičnosti potřeba provést/brát v potaz.

3.12 Využití výpočetní techniky [19]

V dnešní době se výrazně uplatňuje využití výpočetní techniky v celé oblasti tváření. Pomocí konstrukčních CAD programů lze navrhovat výtažky libovolných tvarů, spočítat ideální rozvinutý tvar takového výtažku (viz příloha 4) a provádět simulace tažení (pomocí MKP¹⁴) a jejich vyhodnocování a následnou optimalizaci, což ve své podstatě vede ke snížení výrobních nákladů.

Mezi používané konstrukční CAD programy patří:

- SolidWorks (proprietární),
- Solid Edge (proprietární),
- Inventor (proprietární),
- Catia (proprietární),
- FreeCAD (open source).

U simulačních (MKP) programů se lze setkat s:

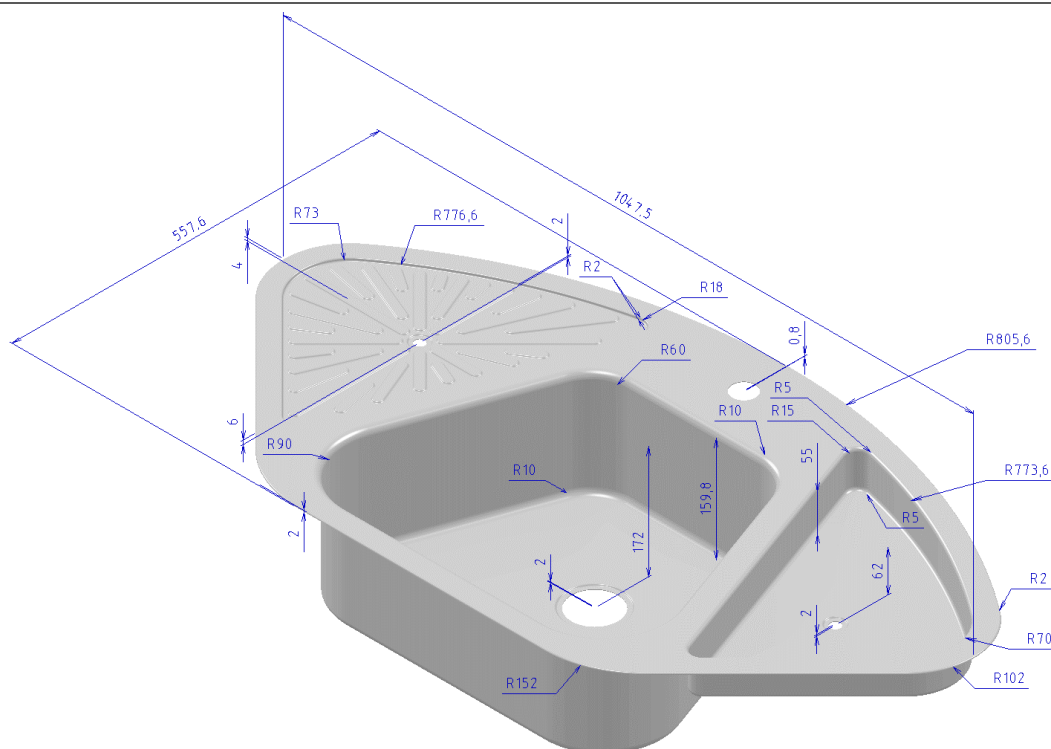
- Ansys (proprietární),
- Abaqus (proprietární),
- Calculix (open source).

Velkou nevýhodou výše uvedených proprietárních programů je jejich vysoká cena a další dodatečné náklady na školení, předplacenou podporu (údržbu) atd. Výše uvedenou nevýhodu částečně napravují široké možnosti těchto programů a jejich uživatelská přívětivost.

U open source programů odpadá nevýhoda s cenou, oproti tomu jsou takové programy méně uživatelsky přívětivé a jejich používání vyžaduje vyšší množství času a zkušeností.

¹⁴ MKP – metoda konečných prvků (anglicky FEM – finite element method).

4 NÁVRH ŘEŠENÍ [36], [37]



Obr. 27 Základní rozměry výtažku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2 a 2.1., výroba zadané součásti (viz obr. 27) bude tažením přístřihu plechu tl. 0,8 mm z materiálu 1.4301 ve vyžíhaném stavu pomocí konvenčního nástroje.

Mechanické vlastnosti použitého materiálu jsou uvedeny v tabulce 10, chemické složení v tabulce 11 a tahový diagram v příloze 5.

Tab. 10 Mechanické vlastnosti materiálu 1.4301 ve vyžíhaném stavu [36], [37]

Vlastnost	Hodnota
Modul pružnosti E	$2,0 \cdot 10^{11}$ Pa
Poissonův poměr μ	0,28
Hustota ρ	$7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Pevnost v tahu R_m	595 MPa
Mez kluzu R_e	210 MPa
Tažnost A	59 %

Tab. 11 Chemické složení materiálu 1.4301 [36]

Prvek	Hmotnostní podíl [%]
Železo (Fe)	66,5 – 74
Chrómov (Cr)	18 – 20
Nikl (Ni)	8 – 10,5
Mangan (Mn)	0 – 2
Křemík (Si)	0 – 0,75
Dusík (N)	0 – 0,1
Uhlík (C)	do 0,08
Fosfor (P)	0 – 0,045
Sýra (S)	0 – 0,03

4.1 Analýza technologičnosti a předběžný návrh výrobního postupu

Co se týče použitého materiálu, jeho použití vzhledem k účelu výsledného výrobku je oprávněné (viz kapitola 2). Výhodou je relativně nízká mez kluzu (210 MPa, o 20 MPa vyšší, než nejlepší hlubokotažné plechy) a vysoká tažnost, která je nad úrovní hlubokotažných ocelí. Nevýhodou je vysoká míra zpevňování (viz příloha 5), kde $Re/Rm = 210/595 = 0,35$, což je méně, než v případě hlubokotažných plechů a z toho plyne i vyšší tažná síla (zvyšuje riziko vzniku trhlin a odtržení dna výtažku) a odpružení po tváření (nutná kalibrace). Další nevýhodou jsou i horší frikční vlastnosti použité oceli, což s sebou ponese i vyšší požadavky na mazání a materiál tažidla.

Z hlediska konstrukčního a technologického se jedná o tvarově složitý výtažek s přírubou se zakřiveným dnem. Co se týče poloměru funkční hrany tažníku a tažnice, u hlavního dřezu není třeba zvláště řešit, protože požadovaný poloměr zaoblení u dna i v horní části je 10 mm (viz obr. 27) a podle kapitoly 3.4, respektive tabulky 5 je vzhledem k tloušťce taženého plechu (0,8 mm) i při maximálním průměru tažníku minimální poloměr 5,6 mm, což je s rezervou splněno. To samé platí i v případě vedlejšího dřezu, kde pro maximální poloměr tažníku 70 mm je minimální poloměr zaoblení 4 mm, což je opět splněno.

Předběžný návrh výrobního postupu je tedy následující:

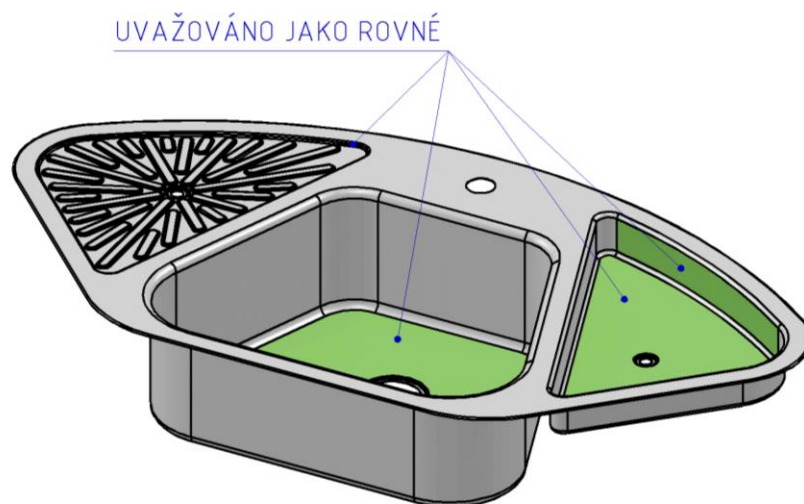
1. vypálení obvodu polotovaru pomocí laseru¹⁵,
2. tažení hlavního dřezu,
3. tažení vedlejšího dřezu a okapnice,
4. ostřížení obvodu a děrování otvorů,
5. lemování,
6. kontrola,
7. balení a expedice.

Z technologického hlediska může být problém velká příruba při tažení hlavního dřezu, kde lze očekávat vznik zvlnění a v oblasti hlavního dřezu i k vysoké napjatosti.

Jelikož je výsledný výtažek velmi složitý, budou pro další analytické výpočty a analýzy použity následující předpoklady a zjednodušení (viz obr. 28):

- vzhledem k malému zakřivení jsou dna hlavního a vedlejšího dřezu uvažována jako rovná,
- z důvodu velkého poloměru zaoblení (>770 mm) a malé úhlové délce jsou boční stěny vedlejšího dřezu a okapnice uvažovány jako rovné,
- vlastnosti materiálu jsou uvažovány jako ideálně homogenní a izotropní v celém jeho objemu.

¹⁵ Použití laseru k vypálení obvodu způsobí tepelné ovlivnění materiálu v místě řezu. Vzhledem k tomu, že příruba bude po tažení odstřížena, toto tepelné ovlivnění ničemu nevádí.

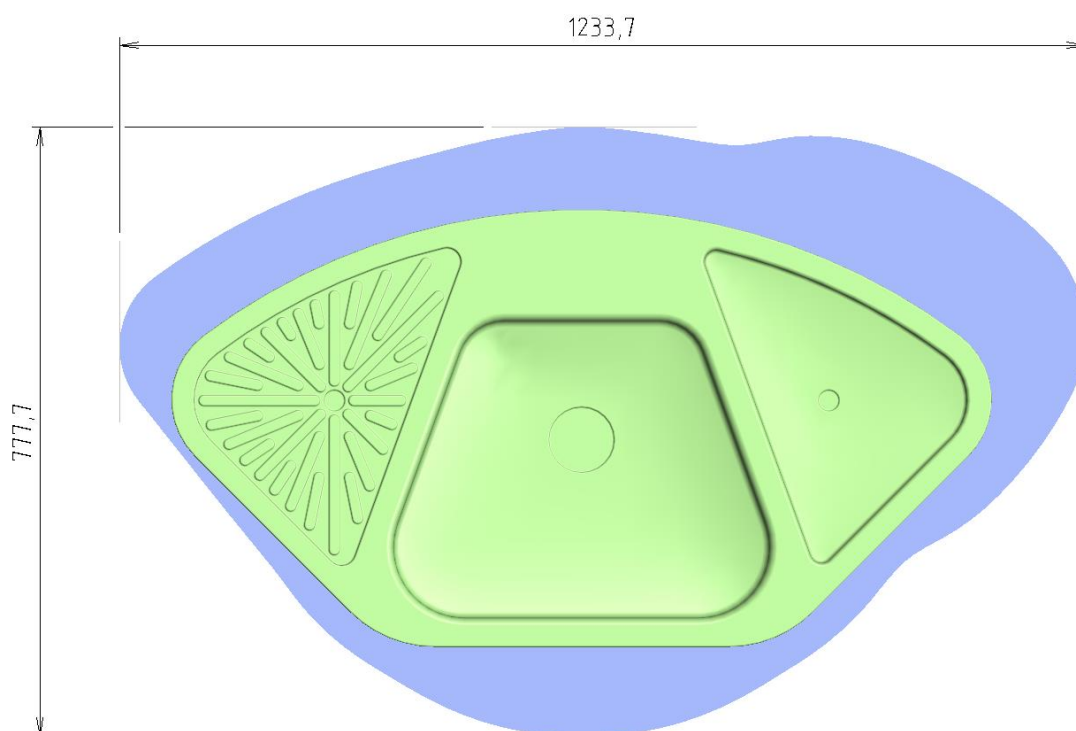


Obr. 28 Ilustrace aplikovaných zjednodušení

4.2 Návrh polotovaru

Pro určení rozvinutého tvaru polotovaru byl použit software SolidWorks, kde pro správné určení tvaru bylo potřeba zvolit místo (bod), pro který platí, že jeho poloha vůči tažníku je během tažení konstantní (nedochází ke smýkání). Jako ideální místo byl zvolen střed otvoru v hlavním dřezu (viz příloha 6).

Výsledný rozvinutý tvar bez přídavků na ostřížení je zobrazen na obrázku níže.



Obr. 29 Rozvinutý tvar výtažku

Jelikož zatím není znám přesný počet operací, nelze zatím přesně určit přídavky na ostřížení. Ty budou určeny později.

4.3 Technologické výpočty zadané součásti

Na základě geometrie zadané součásti bylo rozhodnuto, že nejvýhodnější bude nejprve táhnout hlavní dřež a následně vedlejší dřež společně s okapnicí. Je to z toho důvodu, že v případě tažení všech částí naráz by příruba (můstek) mezi hlavním a vedlejším dřezem fungoval podobně jako brzdící žebro, které by však zabraňovalo přisunu materiálu z vedlejšího dřezu do hlavního a tím lze i očekávat vznik trhliny.

Pro určení počtu tahů daných tažných operací se nejprve stanoví počet tahů na dokončení hlavního dřezu, dále vedlejšího dřezu společně s okapnicí a nakonec jedna operace pro lemování obvodu.

- Hlavní dřež

Použitím tabulky 1 z kapitoly 3.3 lze určit maximální dosažitelnou hloubku H v 1. tahu v závislosti na poloměru zaoblení v rozích výtažku R_b . Poloměry zaoblení v rozích výtažku hlavního dřezu jsou $R_b = \{60; 90\}$ mm. Pak platí:

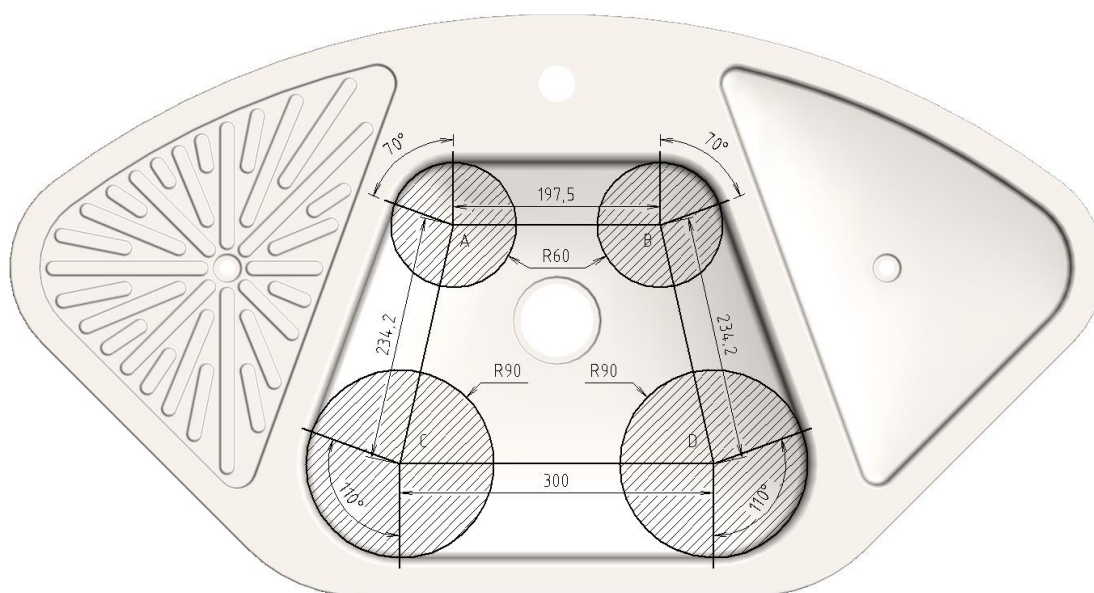
$$H_{Hmax1} = (4 - 1) \cdot R_b = \min((4 - 1) \cdot \{60; 90\}) = 3 \cdot 60 = 180 \text{ mm}$$

Maximální dosažitelná hloubka při tažení hlavního dřezu je v prvním tahu 180 mm, což je více, než požadovaných 160 mm. Při použití tohoto kritéria tedy lze hlavní dřež tvářet na 1 tah.

Z důvodu vyšší bezpečnosti při použití jiné, než hlubokotažné oceli byla dle doporučení maximální výška v 1. tahu u výše uvedeného výpočtu snížena o $1 \cdot R_b$.

Další možností určení potřebného počtu tahů je použitím rovnice 3.7 podle Forejta a Bareše pro jednotlivé rohy.

- a) Výpočet pro roh A a roh B (viz obr. 30)



Obr. 30 Parametry rohů hlavního dřezu

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RA} = D_{0RB} = 2 \cdot \sqrt{R_{bA}^2 + 2 \cdot R_{bA} \cdot H_A - 0,85 \cdot R_{bA} \cdot R_{dA} - 0,14 \cdot R_{dA}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{60^2 + 2 \cdot 60 \cdot 160 - 0,85 \cdot 60 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 298,5 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten byl na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_A = 70^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RA}} \cdot 100 = \frac{0,8}{298,5} \cdot 100 = 0,27$ a délku $\{\overline{AC} = \overline{BD}; \overline{AB}\} = \{234,2; 197,5\} \text{ mm}$:

$$\overline{m}_{180^\circ A} = \overline{m}_{180^\circ B} = \frac{m_{180^\circ \overline{AC}} + m_{180^\circ \overline{AB}}}{2} = \frac{0,55 + 0,56}{2} = 0,56$$

$$\overline{m}_{90^\circ A} = \overline{m}_{90^\circ B} = \frac{m_{90^\circ \overline{AC}} + m_{90^\circ \overline{AB}}}{2} = \frac{0,50 + 0,53}{2} = 0,52$$

$$m_{70^\circ A} = m_{70^\circ B} = \frac{\overline{m}_{180^\circ A} - \overline{m}_{90^\circ A}}{90} \cdot \alpha_A + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ A} - \overline{m}_{180^\circ A}$$

$$= \frac{0,56 - 0,52}{90} \cdot 70 + 2 \cdot 0,52 - 0,56 = 0,51$$

Pak pro zhotovení řešených rohů na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daných rohů, tedy:

$$m_A = m_B = \frac{2 \cdot R_{bA}}{D_{0RA}} \geq m_{70^\circ A}$$

$$m_A = m_B = \frac{2 \cdot 60}{298,5} = 0,40 \not\geq 0,51$$

Jelikož výše uvedená podmínka není splněna, bude k určení přibližného počtu tahů pro zhotovení řešených rohů použit vztah podle Forejta a Bareše, tedy aplikací rovnice 3.7:

$$g_A = g_B = 1 + \frac{\ln(d_A) - \ln(m_{70^\circ A} \cdot D_{0RA})}{\ln(m_s)} = 1 + \frac{\ln(120) - \ln(0,51 \cdot 298,5)}{\ln(0,80)} = 2,07$$

$$\approx 2$$

Podle Forejta a Bareše jsou zapotřebí 2 tahy pro zhotovení rohu A a B hlavního drezu.

b) Výpočet pro roh C a roh D (viz obr. 30)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RC} = D_{0RD} = 2 \cdot \sqrt{R_{bC}^2 + 2 \cdot R_{bC} \cdot H_C - 0,85 \cdot R_{bC} \cdot R_{dC} - 0,14 \cdot R_{dC}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{90^2 + 2 \cdot 90 \cdot 160 - 0,85 \cdot 90 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 380,1 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_C = 110^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RC}} \cdot 100 = \frac{0,8}{380,1} \cdot 100 = 0,21$ a délku $\{\overline{CA} = \overline{DB}; \overline{CD}\} = \{234,2; 300\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ C} = \overline{m}_{180^\circ D} = \frac{m_{180^\circ \overline{CD}} + m_{180^\circ \overline{CA}}}{2} = \frac{0,56 + 0,56}{2} = 0,56$$

$$\overline{m}_{90^\circ C} = \overline{m}_{90^\circ D} = \frac{m_{90^\circ \overline{CD}} + m_{90^\circ \overline{CA}}}{2} = \frac{0,53 + 0,53}{2} = 0,53$$

$$\begin{aligned} m_{110^\circ C} = m_{110^\circ D} &= \frac{\overline{m}_{180^\circ C} - \overline{m}_{90^\circ C}}{90} \cdot \alpha_C + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ C} - \overline{m}_{180^\circ C} \\ &= \frac{0,56 - 0,53}{90} \cdot 110 + 2 \cdot 0,53 - 0,56 = 0,54 \end{aligned}$$

Pak pro zhotovení řešených rohů na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daných rohů, tedy:

$$\begin{aligned} m_C = m_D &= \frac{2 \cdot R_{bC}}{D_{0RC}} \geq m_{110^\circ C} \\ m_C = m_D &= \frac{2 \cdot 90}{380,1} = 0,47 \not\geq 0,54 \end{aligned}$$

Jelikož výše uvedená podmínka není splněna, bude k určení přibližného počtu tahů pro zhotovení řešených rohů použit vztah podle Forejta a Bareše, tedy aplikací rovnice 3.7:

$$\begin{aligned} g_C = g_D &= 1 + \frac{\ln(d_C) - \ln(m_{110^\circ C} \cdot D_{0RC})}{\ln(m_s)} = 1 + \frac{\ln(180) - \ln(0,54 \cdot 380,1)}{\ln(0,80)} = 1,59 \\ &\approx 2 \end{aligned}$$

Podle Forejta a Bareše jsou zapotřebí 2 tahy pro zhotovení rohu C a D hlavního dřezu.

- Vedlejší dřež

Použitím tabulky 1 z kapitoly 3.3 lze určit maximální dosažitelnou hloubku H v 1. tahu v závislosti na poloměru zaoblení v rozích výtažku R_b . Poloměry zaoblení v rozích výtažku vedlejšího dřezu jsou $R_b = \{15; 70\}$ mm. Pak platí:

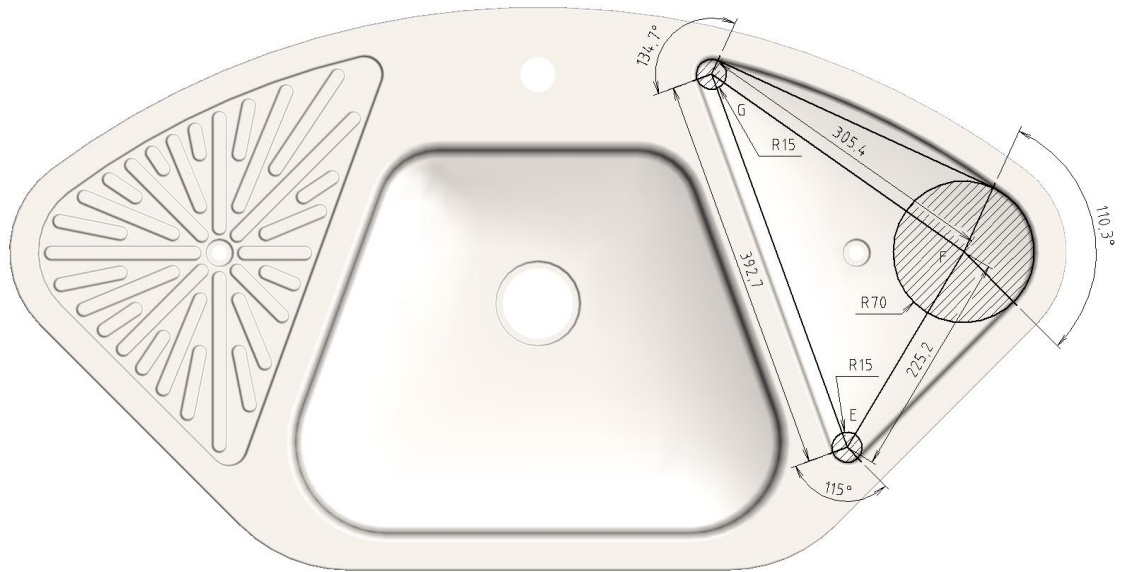
$$\begin{aligned} H_{Vmax1} &= \min\{(5 - 1) \cdot R_b; (4 - 1) \cdot R_b\} = \min\{(5 - 1) \cdot 15; (4 - 1) \cdot 70\} \\ &= \min\{60; 210\} = 60 \text{ mm} \end{aligned}$$

Maximální dosažitelná hloubka při tažení vedlejšího dřezu je v prvním tahu 60 mm, což je více, než požadovaných 55 mm. Při použití tohoto kritéria tedy lze hlavní dřež tvářet na 1 tah.

Z důvodu vyšší bezpečnosti při použití jiné, než hlubokotažné oceli byla dle doporučení maximální výška v 1. tahu u výše uvedeného výpočtu snížena o $1 \cdot R_b$.

Další možností určení potřebného počtu operací je použitím rovnice 13 podle Forejta a Bareše pro jednotlivé rohy.

a) Výpočet pro roh E (viz obr. 31)



Obr. 31 Parametry rohů vedlejšího dřezu

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{ORE} = 2 \cdot \sqrt{R_{bE}^2 + 2 \cdot R_{bE} \cdot H_E - 0,85 \cdot R_{bE} \cdot R_{dE} - 0,14 \cdot R_{dE}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{15^2 + 2 \cdot 15 \cdot 55 - 0,85 \cdot 15 \cdot 5 - 0,14 \cdot 5^2} = 85,0 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten byl na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_E = 115^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RE}} \cdot 100 = \frac{0,8}{85,0} \cdot 100 = 0,94$ a délku $\{\overline{EG}; \overline{EF}\} = \{392,7; 225,2\}$ mm:

$$\overline{m_{180^\circ E}} = \frac{m_{180^\circ EG} + m_{180^\circ EF}}{2} = \frac{0,44 + 0,44}{2} = 0,44$$

$$\overline{m_{90^\circ E}} = \frac{m_{90^\circ EG} + m_{90^\circ EF}}{2} = \frac{0,32 + 0,32}{2} = 0,32$$

$$m_{115^{\circ}E} = \frac{\overline{m_{180^{\circ}E}} - \overline{m_{90^{\circ}E}}}{90} \cdot \alpha_E + 2 \cdot \overline{m_{90^{\circ}E}} - \overline{m_{180^{\circ}E}}$$

$$= \frac{0,44 - 0,32}{90} \cdot 115 + 2 \cdot 0,32 - 0,44 = 0,35$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_E = \frac{2 \cdot R_{bE}}{D_{0RE}} \geq m_{115^\circ E}$$

$$m_E = \frac{2 \cdot 15}{85,0} = 0,35 \geq 0,35$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

b) Výpočet pro roh F (viz obr. 31)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RF} = 2 \cdot \sqrt{R_{bF}^2 + 2 \cdot R_{bF} \cdot H_F - 0,85 \cdot R_{bF} \cdot R_{dF} - 0,14 \cdot R_{dF}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{70^2 + 2 \cdot 70 \cdot 55 - 0,85 \cdot 70 \cdot 5 - 0,14 \cdot 5^2} = 221,8 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_F = 110,3^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RF}} \cdot 100 = \frac{0,8}{221,8} \cdot 100 = 0,36$ a délku $\{\overline{FG}; \overline{FE}\} = \{305,4; 225,2\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ F} = \frac{m_{180^\circ FG} + m_{180^\circ FE}}{2} = \frac{0,53 + 0,54}{2} = 0,54$$

$$\overline{m}_{90^\circ F} = \frac{m_{90^\circ FG} + m_{90^\circ FE}}{2} = \frac{0,48 + 0,51}{2} = 0,50$$

$$m_{110,3^\circ F} = \frac{\overline{m}_{180^\circ F} - \overline{m}_{90^\circ F}}{90} \cdot \alpha_F + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ F} - \overline{m}_{180^\circ F}$$

$$= \frac{0,54 - 0,50}{90} \cdot 110,3 + 2 \cdot 0,50 - 0,54 = 0,51$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_F = \frac{2 \cdot R_{bF}}{D_{0RF}} \geq m_{110,3^\circ F}$$

$$m_F = \frac{2 \cdot 70}{221,8} = 0,63 \geq 0,51$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

c) Výpočet pro roh G (viz obr. 31)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RG} = 2 \cdot \sqrt{R_{bG}^2 + 2 \cdot R_{bG} \cdot H_G - 0,85 \cdot R_{bG} \cdot R_{dG} - 0,14 \cdot R_{dG}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{15^2 + 2 \cdot 15 \cdot 55 - 0,85 \cdot 15 \cdot 5 - 0,14 \cdot 5^2} = 85,0 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_G = 134,7^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RG}} \cdot 100 = \frac{0,8}{85,0} \cdot 100 = 0,94$ a délku $\{\overline{GE}; \overline{GF}\} = \{392,7; 305,4\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ G} = \frac{m_{180^\circ \overline{GE}} + m_{180^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,44 + 0,44}{2} = 0,44$$

$$\overline{m}_{90^\circ G} = \frac{m_{90^\circ \overline{GE}} + m_{90^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,32 + 0,32}{2} = 0,32$$

$$m_{134,7^\circ G} = \frac{\overline{m}_{180^\circ G} - \overline{m}_{90^\circ G}}{90} \cdot \alpha_G + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ G} - \overline{m}_{180^\circ G}$$

$$= \frac{0,44 - 0,32}{90} \cdot 134,7 + 2 \cdot 0,32 - 0,44 = 0,38$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_G = \frac{2 \cdot R_{bG}}{D_{0RG}} \geq m_{134,7^\circ G}$$

$$m_G = \frac{2 \cdot 15}{85,0} = 0,35 \not\geq 0,38$$

Jelikož výše uvedená podmínka není splněna, bude k určení přibližného počtu tahů pro zhotovení řešeného rohu použit vztah podle Forejta a Bareše, tedy aplikací rovnice 3.7:

$$g_G = 1 + \frac{\ln(d_G) - \ln(m_{134,7^\circ G} \cdot D_{0RG})}{\ln(m_s)} = 1 + \frac{\ln(30) - \ln(0,38 \cdot 85,0)}{\ln(0,80)} = 1,33 \approx 1$$

Podle Forejta a Bareše je zapotřebí 1 tah pro zhotovení rohu G vedlejšího dřezu.

Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že tažení rohů A – D a rohu G bude doprovázeno zvýšeným rizikem vzniku trhliny. Jelikož jsou však vzhledem k tvarové složitosti výtažku všechny výše uvedené výpočty přibližné, tak i z ekonomického důvodu bude dále počítáno se zhotovením hlavního dřezu na 1 tah a tažení vedlejšího dřezu také na 1 tah. V případě, že numerická simulace prokáže nutnost táhnout hlavní nebo vedlejší dřež na 2 tahy, bude provedena úprava problematické geometrie dřezu tak, aby bylo možné zhotovit hlavní a vedlejší dřež na 1 tah při zachování funkčnosti, jelikož geometrie dřezu není striktně stanovena.

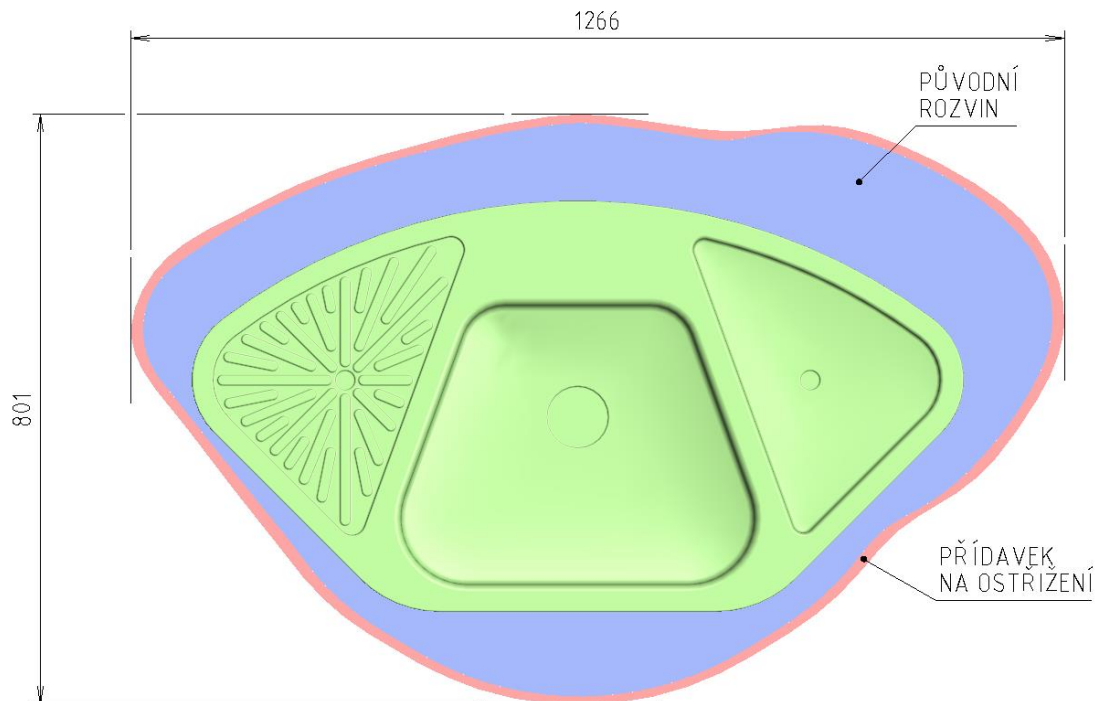
- Konečný výrobní postup a volba přídaveků na ostřížení

Na základě předchozích výpočtů je možno sestavit finální tvar výrobního postupu, tedy:

1. vypálení obvodu polotovaru pomocí laseru,
2. aplikace maziva,
3. tažení hlavního dřezu včetně prolisu (1 tah),
4. tažení vedlejšího dřezu včetně prolisu a okapnice (1 tah),
5. ostřížení obvodu a děrování otvorů,
6. lemování obvodu (1 tah),
7. odstranění maziva,
8. kontrola,
9. balení a expedice.

Pro zhotovení dílu bude potřeba 3 tažných operací vždy po jednom tahu.

Přídavky byly zvoleny na základě [10] a to 3 % pro 1 tah (viz obr. 32).



Obr. 32 Rozvinutý tvar výtažku s přídavkem na ostřížení

- Užití přidržovače

Jelikož se jedná o tažení tvarově složité součásti, bude při tažení hlavního i vedlejšího dřezu užito přidržovače pro zabránění ztráty vnitřní stability a vzniku zvlnění taženého materiálu.

Na základě tabulky 6 byl zvolen měrný tlak přidržovače pro tažení nerezové oceli $p_p = 2 \text{ MPa}$.

Pak přidržovací síla pro 1. operaci je vypočtena na základě obecně známého vztahu:

$$F_{p1} = p_p \cdot S_{p1} = 2 \cdot 562865 = 1,1 \text{ MN}$$

A pro druhou operaci:

$$F_{p2} = p_p \cdot S_{p2} = 2 \cdot 410233 = 0,8 \text{ MN}$$

A pro lemování:

$$F_{p3} = p_p \cdot S_{p3} = 2 \cdot 120367 = 0,2 \text{ MN}$$

Kde pro výpočet ploch S_p byl použit software SolidWorks.

- Parametry tažidla

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, podle kapitoly 3.4, respektive tabulky 5 je vzhledem k tloušťce taženého plechu (0,8 mm) i při maximálním průměru tažníku (180 mm) minimální poloměr 5,6 mm, v případě výtažku je však požadováno 9,2 mm, což je bez problémů splněno. To samé platí i v případě vedlejšího dřezu, kde pro maximální poloměr tažníku (70 mm) je minimální poloměr zaoblení 4 mm, v případě výtažku je však požadováno 4,2 mm, což je také bez problémů splněno.

Poloměry funkční hrany tažníku a tažnice tedy budou pro tažení hlavního dřezu 9,2 mm a v případě vedlejšího dřezu 4,2 mm.

Tažná mezera bude na základě normy ČSN 22 7303 pro rovné úseky $1,30 \cdot t = 1,30 \cdot 0,8 = 1,04 \text{ mm}$ a pro rohy $1,40 \cdot t = 1,40 \cdot 0,8 = 1,12 \text{ mm}$

- Parametry tažení

Aby byl zajištěn co nejmenší součinitel tření mezi taženým plechem a tažidlem, bude přístřih fosfátován a na základě kapitoly 3.10, respektive tabulky 9 na přístřih plechu aplikováno mazivo: řepkový olej + běloba olovnatá + sirný květ.

Jako materiál funkčních částí tažidla bude na základě kapitoly 3.9, respektive tabulky 8 a z důvodu tvarové složitosti taženého materiálu použit tvrdý bronz. Jelikož by však bylo použití tohoto materiálu pro celé tažidlo velmi nákladné, bude místo toho použito vložkování a jako základní materiál tažidla bude použita konstrukční ocel.

Na základě taženého materiálu by tažná rychlost podle kapitoly 3.8, respektive tabulky 7 neměla přesáhnout $7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

- Tažná síla a práce

Pro 1. tažnou operaci, tedy tažení hlavního dřezu je tažná síla rovna součtu tažných sil pro tažení rohů a rovných úseků, tedy:

$$\begin{aligned} F_{c1} &= F_{1,1} + F_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2 \\ &= 492,2 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 962,1 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 254,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kde součin $2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.

A tažná práce:

$$A_{t1} \approx F_{c1} \cdot C_3 \cdot h_1 = 254500 \cdot 0,8 \cdot 0,172 = 35 \text{ kJ}$$

Pro 2. tažnou operaci, tedy tažení vedlejšího dřezu je tažná síla:

$$\begin{aligned} F_{c2} &= F_{2,1} + F_{2,2} = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2 \\ &= 182,3 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 931,5 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 176,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kde součin $2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.
A tažná práce:

$$A_{t2} \approx F_{c2} \cdot C_3 \cdot h_2 = 176400 \cdot 0,8 \cdot 0,055 = 7,8 \text{ kJ}$$

Pro lisování okapnice je tažná síla:

$$\begin{aligned} F_{c3} = F_{3,1} + F_{3,2} &= 29 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2 \\ &= 1384,2 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 4847,4 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 1,0 \text{ MN} \end{aligned}$$

Kde součin $29 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.
A tažná práce:

$$A_{t3} \approx F_{c3} \cdot C_3 \cdot h_3 = 1,0 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,006 = 4,8 \text{ kJ}$$

Vzhledem ke geometrii obvodového lemu a předpokladu, že lemovací síla bude výrazně menší, než tažná, bude lemovací síla určena na základě numerické simulace.

- Numerická simulace

Pro kontrolu výše uvedených výpočtů a možnosti táhnout dřež v jednotlivých tažných operacích na 1 tah, byla provedena numerická simulace respektující výše uvedené parametry tažidla, tažení a materiálu.

K simulaci byl použit komerční program PAM-STAMP, do něhož byla naimportována geometrie polotovaru a nástrojů, definován součinitel tření $\mu_f = 0,06$ a přidržovací síla $F_P = 1 \text{ MN}$.

Pro definici materiálového modelu byl použit záznam z tahové zkoušky (viz příloha 5), který byl přepočten na závislost napětí na přetvoření (viz příloha 7). Dále byl uvažován vliv anizotropie, získaný na základě několika tahových zkoušek a publikovaný v [38] (viz příloha 8).

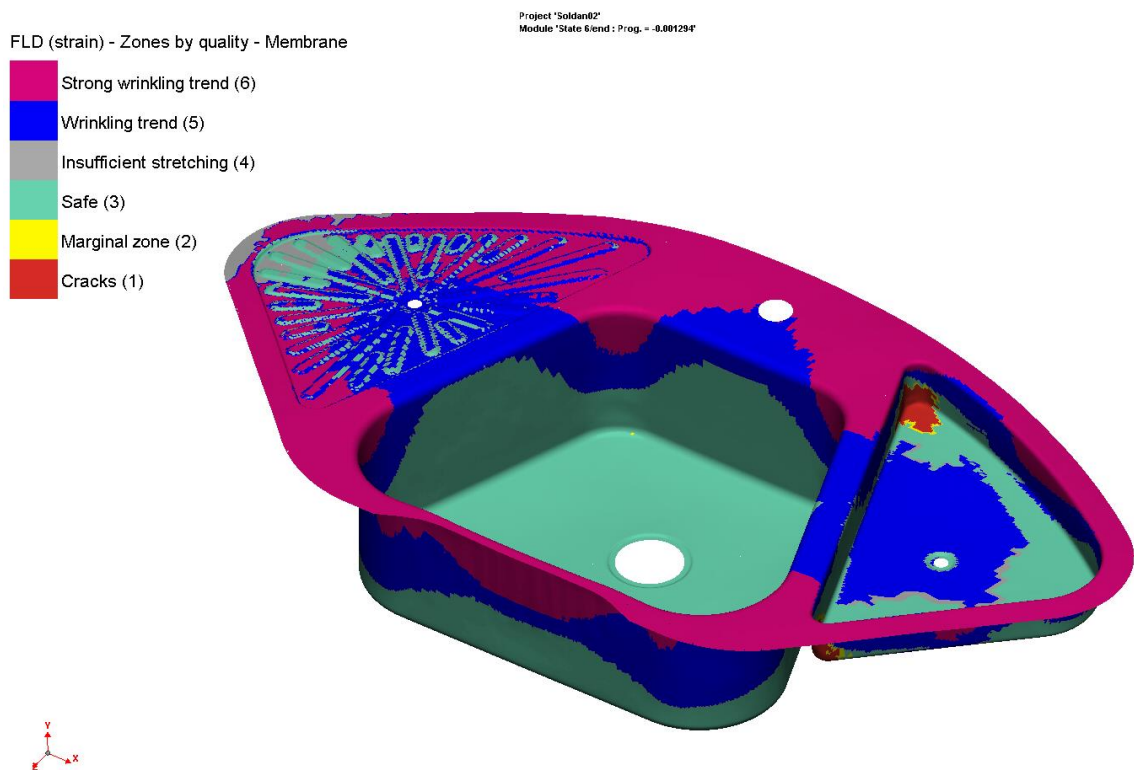
Sledovaným mezním stavem byl mezní stav přetvoření, vyhodnocovaný za použití Keeler-Goodwinova diagramu (někdy také označován „FLD“), který byl publikovaný rovněž v [38] (viz příloha 9).

- Výsledky

Na základě níže uvedených výsledků lze konstatovat, že bylo dosaženo mezního stavu přetvoření, tedy stavu, při kterém je již možné očekávat vznik trhlin.

Z obrázku 33 a přílohy 10 je možné vyčíst, že problematickými místy na výtažku jsou především ostré rohy vedlejšího dřezu, které se již nachází v oblasti nepřípustných přetvoření (viz příloha 10). Dále oblast rohů hlavního dřezu je již velmi blízko tzv. přechodové zóně FLD, která je obvykle o 10 % níže, než limitní křivky (z důvodu bezpečnosti).

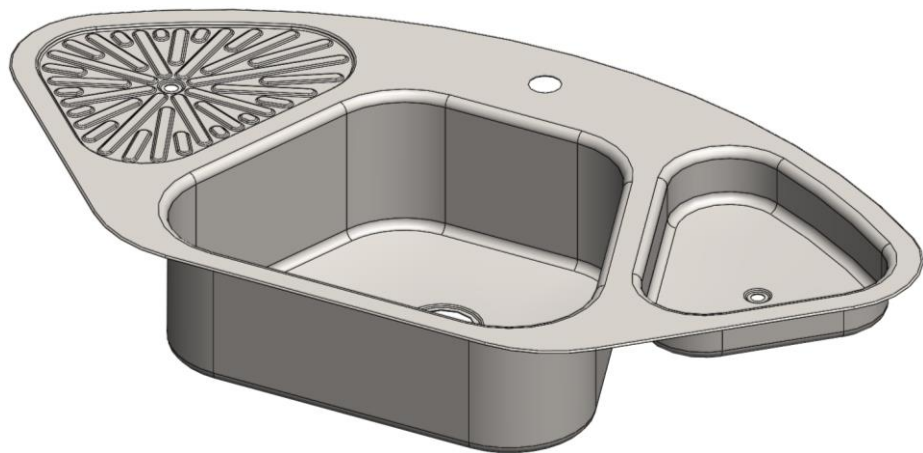
U hlavního dřezu je možné pozorovat, že přídavky v přední části dřezu byly nedostatečné a na přírubu již nezbylo dostatek materiálu. I když se přibližně polovina dřezu nachází v oblasti se silným rizikem vzniku zvlnění, tak vlivem použití přidržovače k žádnému zvlnění nedošlo.



Obr. 33 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD

Na základě výše uvedeného byla provedena úprava geometrie dřezu (viz obr. 34) a to následovně:

- poloměr zaoblení rohů A (R_{bA}) a B (R_{bB}) hlavního dřezu byl zvýšen ze stávajících 60 mm na 90 mm,
- poloměr zaoblení rohů E (R_{bE}), F (R_{bF}) a G (R_{bG}) byl sjednocen na 65 mm,
- poloměr zaoblení u dna a u příruby vedlejšího dřezu byl zvýšen ze stávajících 5 mm na 10 mm,
- geometrie okapnice byla upravena tak, aby vizuálně odpovídala geometrii vedlejšího dřezu.



Obr. 34 Rohový dřez po úpravě geometrie – 2. verze

4.4 Přepočet technologických výpočtů pro 2. verzi zadané součásti

Jelikož došlo ke změně geometrie, bude proveden přepočet všech parametrů z kapitoly 4.3, kterých se tato změna dotkla.

- Hlavní dřež

Použitím tabulky 1 z kapitoly 3.3 lze určit maximální dosažitelnou hloubku H v 1. tahu v závislosti na poloměru zaoblení v rozích výtažku R_b . Poloměr zaoblení v rozích výtažku hlavního dřezu je $R_b = 90$ mm. Pak platí:

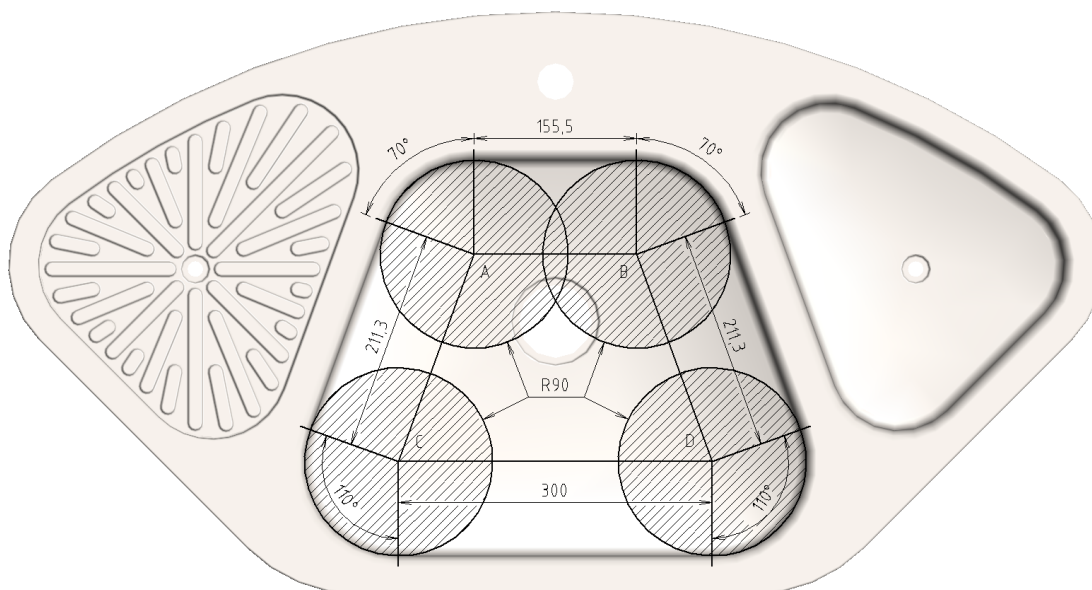
$$H_{Hmax1} = (4 - 1) \cdot R_b = (4 - 1) \cdot 90 = 3 \cdot 90 = 270 \text{ mm}$$

Maximální dosažitelná hloubka při tažení hlavního dřezu je v prvním tahu 270 mm, což je více, než požadovaných 160 mm. Při použití tohoto kritéria tedy lze hlavní dřež tvářet na 1 tah.

Z důvodu vyšší bezpečnosti při použití jiné, než hlubokotažné oceli byla dle doporučení maximální výška v 1. tahu u výše uvedeného výpočtu snížena o $1 \cdot R_b$.

Další možností určení potřebného počtu tahů je použitím rovnice 3.7 podle Forejta a Bareše pro jednotlivé rohy.

- a) Výpočet pro roh A a roh B (viz obr. 35)



Obr. 35 Parametry rohů hlavního dřezu – 2. verze

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$\begin{aligned} D_{0RA} = D_{0RB} &= 2 \cdot \sqrt{R_{bA}^2 + 2 \cdot R_{bA} \cdot H_A - 0,85 \cdot R_{bA} \cdot R_{dA} - 0,14 \cdot R_{dA}^2} \\ &= 2 \cdot \sqrt{90^2 + 2 \cdot 90 \cdot 160 - 0,85 \cdot 90 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 380,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten byl na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole

3.3, tedy pro úhel $\alpha_A = 70^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RA}} \cdot 100 = \frac{0,8}{380,1} \cdot 100 = 0,21$ a délku $\{\overline{AC} = \overline{BD}; \overline{AB}\} = \{211,3; 155,5\}$ mm:

$$\overline{m_{180^\circ A}} = \overline{m_{180^\circ B}} = \frac{m_{180^\circ AC} + m_{180^\circ AB}}{2} = \frac{0,58 + 0,58}{2} = 0,58$$

$$\overline{m_{90^\circ A}} = \overline{m_{90^\circ B}} = \frac{m_{90^\circ AC} + m_{90^\circ AB}}{2} = \frac{0,55 + 0,55}{2} = 0,55$$

$$\begin{aligned} m_{70^\circ A} = m_{70^\circ B} &= \frac{\overline{m_{180^\circ A}} - \overline{m_{90^\circ A}}}{90} \cdot \alpha_A + 2 \cdot \overline{m_{90^\circ A}} - \overline{m_{180^\circ A}} \\ &= \frac{0,58 - 0,55}{90} \cdot 70 + 2 \cdot 0,55 - 0,58 = 0,54 \end{aligned}$$

Pak pro zhotovení řešených rohů na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daných rohů, tedy:

$$\begin{aligned} m_A = m_B &= \frac{2 \cdot R_{bA}}{D_{0RA}} \geq m_{70^\circ A} \\ m_A = m_B &= \frac{2 \cdot 90}{380,1} = 0,47 \not\geq 0,54 \end{aligned}$$

Jelikož výše uvedená podmínka není splněna, bude k určení přibližného počtu tahů pro zhotovení řešených rohů použit vztah podle Forejta a Bareše, tedy aplikací rovnice 3.7:

$$\begin{aligned} g_A = g_B &= 1 + \frac{\ln(d_A) - \ln(m_{70^\circ A} \cdot D_{0RA})}{\ln(m_s)} = 1 + \frac{\ln(180) - \ln(0,54 \cdot 380,1)}{\ln(0,80)} = 1,59 \\ &\approx 2 \end{aligned}$$

Podle Forejta a Bareše jsou zapotřebí 2 tahy pro zhotovení rohu A a B hlavního dřezu.

b) Výpočet pro roh C a roh D (viz obr. 35)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$\begin{aligned} D_{0RC} = D_{0RD} &= 2 \cdot \sqrt{R_{bc}^2 + 2 \cdot R_{bc} \cdot H_C - 0,85 \cdot R_{bc} \cdot R_{dc} - 0,14 \cdot R_{dc}^2} \\ &= 2 \cdot \sqrt{90^2 + 2 \cdot 90 \cdot 160 - 0,85 \cdot 90 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 380,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_C = 110^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RC}} \cdot 100 = \frac{0,8}{380,1} \cdot 100 = 0,21$ a délku $\{\overline{CA} = \overline{DB}; \overline{CD}\} = \{211,3; 300\}$ mm:

$$\overline{m_{180^\circ C}} = \overline{m_{180^\circ D}} = \frac{m_{180^\circ CD} + m_{180^\circ CA}}{2} = \frac{0,56 + 0,58}{2} = 0,57$$

$$\overline{m}_{90^\circ C} = \overline{m}_{90^\circ D} = \frac{m_{90^\circ CD} + m_{90^\circ CA}}{2} = \frac{0,53 + 0,55}{2} = 0,54$$

$$\begin{aligned} m_{110^\circ C} = m_{110^\circ D} &= \frac{\overline{m}_{180^\circ C} - \overline{m}_{90^\circ C}}{90} \cdot \alpha_C + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ C} - \overline{m}_{180^\circ C} \\ &= \frac{0,57 - 0,54}{90} \cdot 110 + 2 \cdot 0,54 - 0,57 = 0,54 \end{aligned}$$

Pak pro zhotovení řešených rohů na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daných rohů, tedy:

$$\begin{aligned} m_C = m_D &= \frac{2 \cdot R_{bc}}{D_{0RC}} \geq m_{110^\circ C} \\ m_C = m_D &= \frac{2 \cdot 90}{380,1} = 0,47 \not\geq 0,54 \end{aligned}$$

Jelikož výše uvedená podmínka není splněna, bude k určení přibližného počtu tahů pro zhotovení řešených rohů použit vztah podle Forejta a Bareše, tedy aplikací rovnice 3.7:

$$\begin{aligned} g_C = g_D &= 1 + \frac{\ln(d_C) - \ln(m_{110^\circ C} \cdot D_{0RC})}{\ln(m_s)} = 1 + \frac{\ln(180) - \ln(0,54 \cdot 380,1)}{\ln(0,80)} = 1,59 \\ &\approx 2 \end{aligned}$$

Podle Forejta a Bareše jsou zapotřebí 2 tahy pro zhotovení rohu C a D hlavního dřezu.

- Vedlejší drez

Použitím tabulky 1 z kapitoly 3.3 lze určit maximální dosažitelnou hloubku H v 1. tahu v závislosti na poloměru zaoblení v rozích výtažku R_b . Poloměr zaoblení v rozích výtažku vedlejšího dřezu je $R_b = 65$ mm. Pak platí:

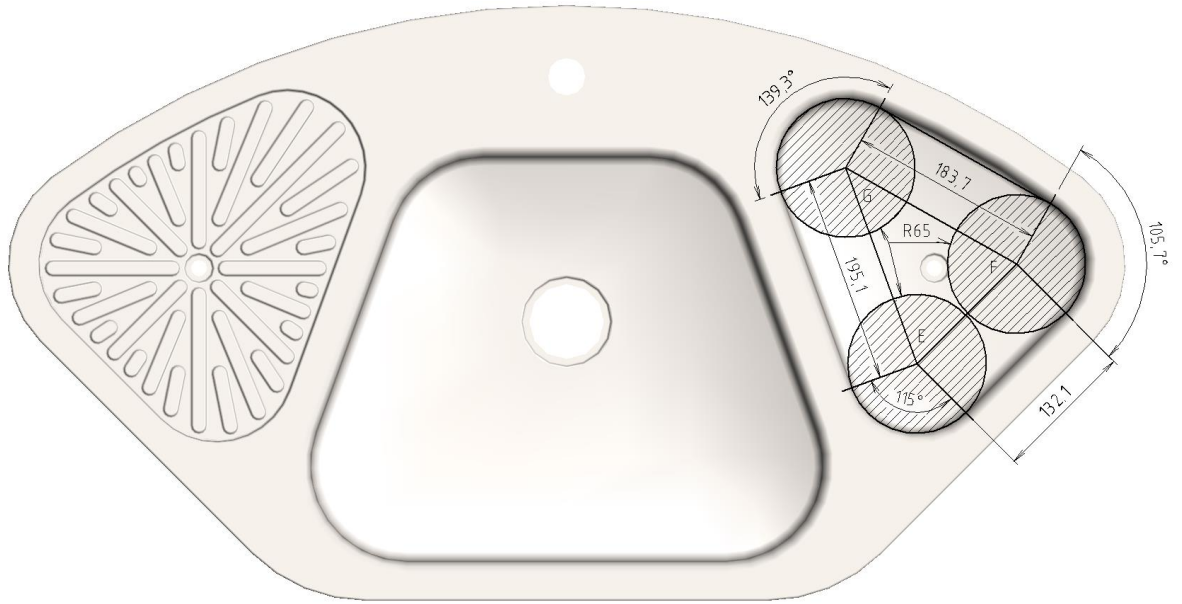
$$H_{Vmax1} = (4 - 1) \cdot R_b = (4 - 1) \cdot 65 = 3 \cdot 65 = 195 \text{ mm}$$

Maximální dosažitelná hloubka při tažení vedlejšího dřezu je v prvním tahu 195 mm, což je více, než požadovaných 55 mm. Při použití tohoto kritéria tedy lze hlavní drez tvářet na 1 tah.

Z důvodu vyšší bezpečnosti při použití jiné, než hlubokotažné oceli byla dle doporučení maximální výška v 1. tahu u výše uvedeného výpočtu snížena o $1 \cdot R_b$.

Další možností určení potřebného počtu operací je použitím rovnice 3.7 podle Forejta a Bareše pro jednotlivé rohy.

a) Výpočet pro roh E (viz obr. 36)



Obr. 36 Parametry rohů vedlejšího dřezu – 2. verze

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RE} = 2 \cdot \sqrt{R_{bE}^2 + 2 \cdot R_{bE} \cdot H_E - 0,85 \cdot R_{bE} \cdot R_{dE} - 0,14 \cdot R_{dE}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 55 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 207,9 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten byl na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_E = 115^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RE}} \cdot 100 = \frac{0,8}{207,9} \cdot 100 = 0,38$ a délku $\{\overline{EG}; \overline{EF}\} = \{195,1; 132,1\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ E} = \frac{m_{180^\circ \overline{EG}} + m_{180^\circ \overline{EF}}}{2} = \frac{0,54 + 0,56}{2} = 0,55$$

$$\overline{m}_{90^\circ E} = \frac{m_{90^\circ \overline{EG}} + m_{90^\circ \overline{EF}}}{2} = \frac{0,51 + 0,53}{2} = 0,52$$

$$m_{115^\circ E} = \frac{\overline{m}_{180^\circ E} - \overline{m}_{90^\circ E}}{90} \cdot \alpha_E + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ E} - \overline{m}_{180^\circ E}$$

$$= \frac{0,55 - 0,52}{90} \cdot 115 + 2 \cdot 0,52 - 0,55 = 0,53$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_E = \frac{2 \cdot R_{bE}}{D_{0RE}} \geq m_{115^\circ E}$$

$$m_E = \frac{2 \cdot 65}{207,9} = 0,63 \geq 0,53$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

b) Výpočet pro roh F (viz obr. 36)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RF} = 2 \cdot \sqrt{R_{bF}^2 + 2 \cdot R_{bF} \cdot H_F - 0,85 \cdot R_{bF} \cdot R_{dF} - 0,14 \cdot R_{dF}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 55 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 207,9 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_F = 105,7^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RF}} \cdot 100 = \frac{0,8}{207,9} \cdot 100 = 0,38$ a délku $\{\overline{FG}; \overline{FE}\} = \{183,7; 132,1\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ F} = \frac{m_{180^\circ FG} + m_{180^\circ FE}}{2} = \frac{0,54 + 0,56}{2} = 0,55$$

$$\overline{m}_{90^\circ F} = \frac{m_{90^\circ FG} + m_{90^\circ FE}}{2} = \frac{0,51 + 0,53}{2} = 0,52$$

$$m_{105,7^\circ F} = \frac{\overline{m}_{180^\circ F} - \overline{m}_{90^\circ F}}{90} \cdot \alpha_F + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ F} - \overline{m}_{180^\circ F}$$

$$= \frac{0,55 - 0,52}{90} \cdot 105,7 + 2 \cdot 0,52 - 0,55 = 0,53$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_F = \frac{2 \cdot R_{bF}}{D_{0RF}} \geq m_{105,7^\circ F}$$

$$m_F = \frac{2 \cdot 65}{207,9} = 0,63 \geq 0,53$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

c) Výpočet pro roh G (viz obr. 36)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RG} = 2 \cdot \sqrt{R_{bG}^2 + 2 \cdot R_{bG} \cdot H_G - 0,85 \cdot R_{bG} \cdot R_{dG} - 0,14 \cdot R_{dG}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 55 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 207,9 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_G = 139,3^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RG}} \cdot 100 = \frac{0,8}{207,9} \cdot 100 = 0,38$ a délku $\{\overline{GE}; \overline{GF}\} = \{195,1; 183,7\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ G} = \frac{m_{180^\circ \overline{GE}} + m_{180^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,54 + 0,54}{2} = 0,44$$

$$\overline{m}_{90^\circ G} = \frac{m_{90^\circ \overline{GE}} + m_{90^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,51 + 0,51}{2} = 0,51$$

$$m_{139,3^\circ G} = \frac{\overline{m}_{180^\circ G} - \overline{m}_{90^\circ G}}{90} \cdot \alpha_G + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ G} - \overline{m}_{180^\circ G}$$

$$= \frac{0,44 - 0,51}{90} \cdot 139,3 + 2 \cdot 0,51 - 0,44 = 0,47$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_G = \frac{2 \cdot R_{bG}}{D_{0RG}} \geq m_{139,3^\circ G}$$

$$m_G = \frac{2 \cdot 65}{207,9} = 0,63 \geq 0,47$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

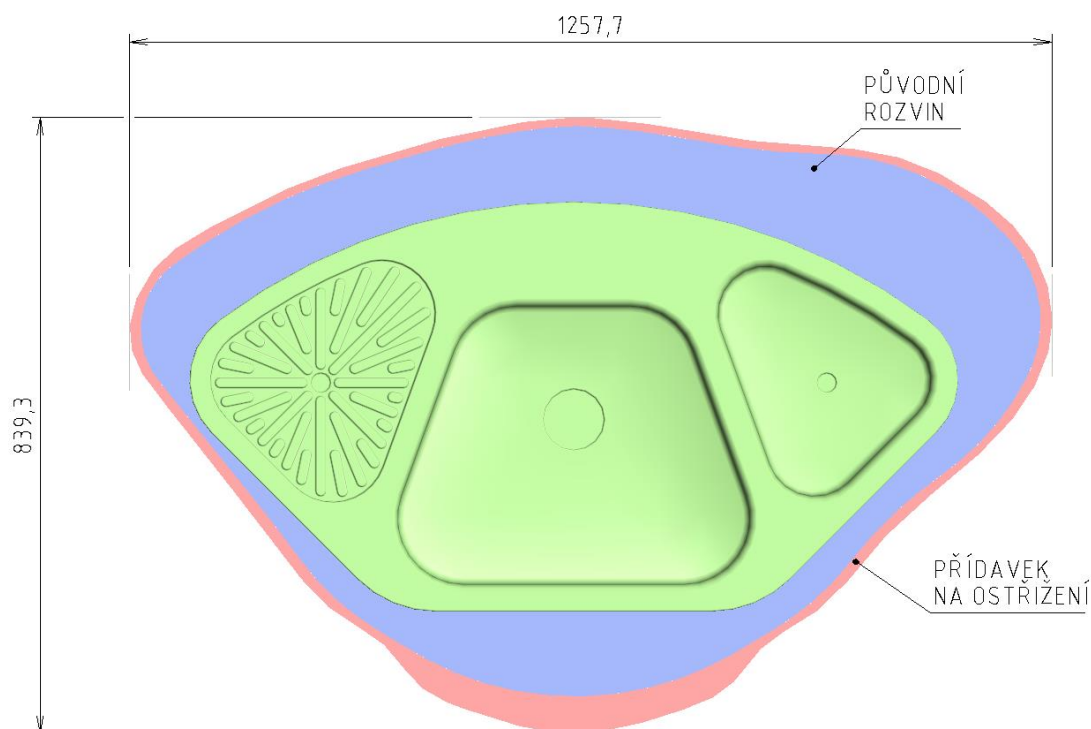
Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že tažení rohů A – D bude doprovázeno zvýšeným rizikem vzniku trhliny. Jelikož jsou však vzhledem k tvarové složitosti výtažku všechny výše uvedené výpočty přibližné, tak i z ekonomického důvodu bude dále počítáno se zhotovením hlavního dřezu na 1 tah a tažení vedlejšího dřezu také na 1 tah. V případě, že numerická simulace prokáže nutnost táhnout hlavní nebo vedlejší dřež na 2 tahy, bude provedena úprava problematické geometrie dřezu tak, aby bylo možné zhotovit hlavní a vedlejší dřež na 1 tah při zachování funkčnosti, jelikož geometrie dřezu není striktně stanovena.

- Konečný výrobní postup a volba přídavek na ostřížení

Výrobní postup zůstává stejný, jako v kapitole 4.3.

Z důvodu změny geometrie dřezu se změnila i geometrie polotovaru a přídavek.

Přídavky byly zvoleny na základě [10] a to 3 % pro 1 tah + vyšší přídavek v přední části hlavního dřezu (viz obr. 37), z důvodu chybějícího materiálu, zjištěného na základě simulace v kapitole 4.3.



Obr. 37 Rozvinutý tvar výtažku s přídavkem na ostřížení – 2. verze

- Užití přídržovače

Z důvodu změn velikostí přidržovaných ploch, byl proveden přepočet přidržovací síly v jednotlivých operacích, při zachování stejného měrného tlaku, jako v kapitole 4.3, tedy $p_p = 2 \text{ MPa}$.

Pak přidržovací síla pro 1. operaci je vypočtena na základě obecně známého vztahu:

$$F_{p1} = p_p \cdot S_{p2} = 2 \cdot 596478 = 1,2 \text{ MN}$$

A pro druhou operaci:

$$F_{p2} = p_p \cdot S_{p2} = 2 \cdot 459607 = 0,9 \text{ MN}$$

A pro lemování:

$$F_{p3} = p_p \cdot S_{p3} = 2 \cdot 136076 = 0,3 \text{ MN}$$

Kde pro výpočet ploch S_p byl použit software SolidWorks.

- Parametry tažidla

Parametry tažidla zůstávají stejné, jako v kapitole 4.3 s tím rozdílem, že poloměr funkční hrany tažníku a tažnice bude v případě tažení hlavního a vedlejšího dřezu stejný, tedy 9,2 mm.

- Parametry tažení

Parametry tažení zůstávají stejné, jako v kapitole 4.3.

- Tažná síla a práce

Z důvodu změn geometrie dřezu byl proveden přepočít sil a prací.

Pro 1. tažnou operaci, tedy tažení hlavního dřezu je tažná síla rovna součtu tažných sil pro tažení rohů a rovných úseků, tedy:

$$F_{c1} = F_{1,1} + F_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2$$

$$= 565,5 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 878,1 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 260,0 \text{ kN}$$

Kde součin $2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.

A tažná práce:

$$A_{t1} \approx F_{c1} \cdot C_3 \cdot h_1 = 260000 \cdot 0,8 \cdot 0,172 = 35,8 \text{ kJ}$$

Pro 2. tažnou operaci, tedy tažení vedlejšího dřezu je tažná síla:

$$F_{c2} = F_{2,1} + F_{2,2} = 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2$$

$$= 391,4 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 528,4 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 168,6 \text{ kN}$$

Kde součin $2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.

A tažná práce:

$$A_{t2} \approx F_{c2} \cdot C_3 \cdot h_2 = 168600 \cdot 0,8 \cdot 0,055 = 7,4 \text{ kJ}$$

Pro lisování okapnice je tažná síla:

$$F_{c3} = F_{3,1} + F_{3,2} = 33 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot t \cdot Rm \cdot C_1 + L \cdot t \cdot Rm \cdot C_2$$

$$= 1996,3 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,5 + 4235,8 \cdot 0,8 \cdot 595 \cdot 0,3 = 1,1 \text{ MN}$$

Kde součin $33 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_b$ a délka L byly určeny pomocí softwaru SolidWorks.

A tažná práce:

$$A_{t3} \approx F_{c3} \cdot C_3 \cdot h_3 = 1,1 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,006 = 5,3 \text{ kJ}$$

- Numerická simulace

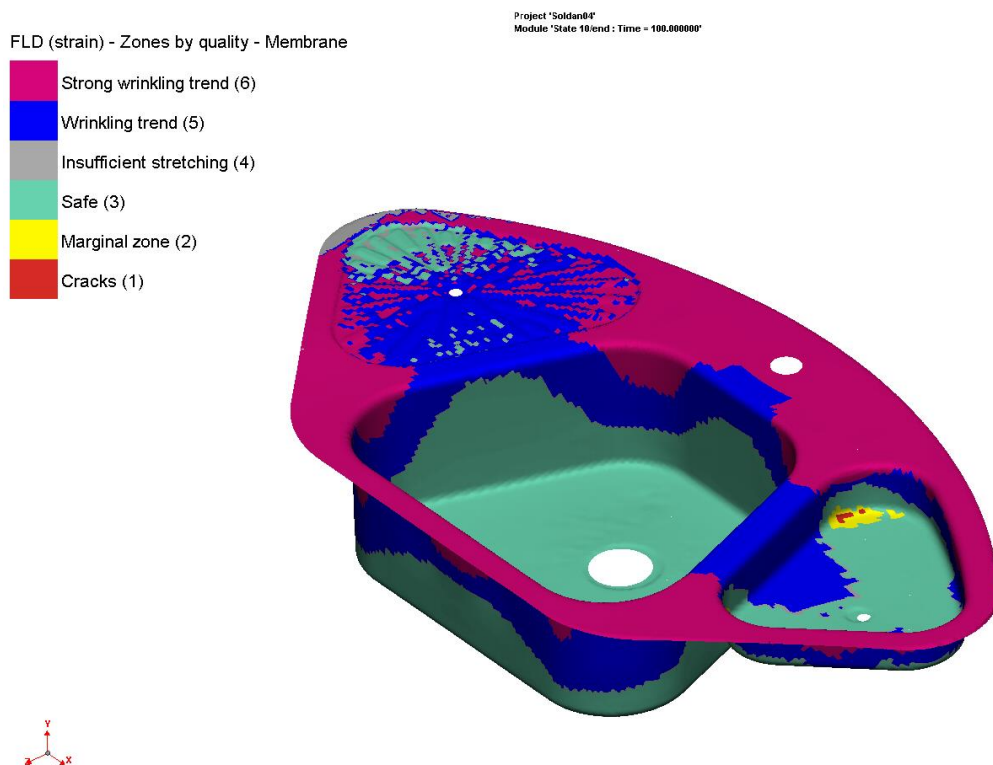
Pro kontrolu výše uvedených výpočtů a možnosti táhnout drez v jednotlivých tažných operacích na 1 tah, byla provedena numerická simulace respektující výše uvedené parametry tažidla, tažení a materiálu.

S výjimkou importované geometrie byly všechny ostatní parametry zachovány, jako v kapitole 4.3.

Na základě níže uvedených výsledků lze konstatovat, že bylo dosaženo mezního stavu přetvoření, tedy stavu, při kterém je již možné očekávat vznik trhlin.

Z obrázku 38 a přílohy 11 je možné vyčíst, že problematickými místy na výtažku jsou především rohy vedlejšího dřezu, které se již nachází v oblasti nepřipustných přetvoření (viz příloha 11).

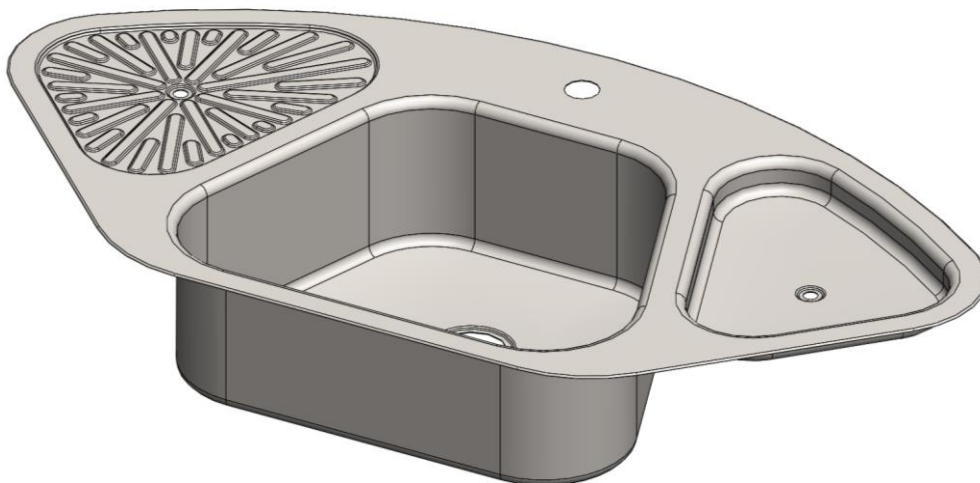
Oproti předchozí simulaci lze pozorovat, že se rohy hlavního dřezu již nachází zcela v bezpečné oblasti a že přidavek materiálu stačí k tomu, aby byla vytvořena souvislá příruba. I když se přibližně polovina dřezu nachází v oblasti se silným rizikem vzniku zvlnění, tak vlivem použití přidržovače k žádnému zvlnění nedošlo.



Obr. 38 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD – 2. verze

Na základě výše uvedeného byla provedena úprava geometrie dřezu (viz obr. 39) a to následovně:

- hloubka vedlejšího dřezu byla snížena z 62 mm na 40 mm.



Obr. 39 Rohový dřez po úpravě geometrie – 3. verze

4.5 Přepočet technologických výpočtů pro 3. verzi zadané součásti

Jelikož došlo ke změně geometrie, bude proveden přepočet všech parametrů z kapitoly 4.4, kterých se tato změna dotkla.

- Hlavní dřež

U hlavního dřezu nedošlo k žádné změně geometrie, všechny výpočty/výsledky jsou tedy stejné, jako v kapitole 4.4.

- Vedlejší dřež

Použitím tabulky 1 z kapitoly 3.3 lze určit maximální dosažitelnou hloubku H v 1. tahu v závislosti na poloměru zaoblení v rozích výtažku R_b . Poloměr zaoblení v rozích výtažku vedlejšího dřezu je $R_b = 65$ mm. Pak platí:

$$H_{Vmax1} = (4 - 1) \cdot R_b = (4 - 1) \cdot 65 = 3 \cdot 65 = 195 \text{ mm}$$

Maximální dosažitelná hloubka při tažení vedlejšího dřezu je v prvním tahu 195 mm, což je více, než požadovaných 40 mm. Při použití tohoto kritéria tedy lze hlavní dřež tvářet na 1 tah.

Z důvodu vyšší bezpečnosti při použití jiné, než hlubokotažné oceli byla dle doporučení maximální výška v 1. tahu u výše uvedeného výpočtu snížena o $1 \cdot R_b$.

Další možností určení potřebného počtu operací je použitím rovnice 3.7 podle Forejta a Bareše pro jednotlivé rohy.

- a) Výpočet pro roh E (viz obr. 36)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$\begin{aligned} D_{ORE} &= 2 \cdot \sqrt{R_{bE}^2 + 2 \cdot R_{bE} \cdot H_E - 0,85 \cdot R_{bE} \cdot R_{dE} - 0,14 \cdot R_{dE}^2} \\ &= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 35 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 181,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten byl na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_E = 115^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{ORE}} \cdot 100 = \frac{0,8}{181,2} \cdot 100 = 0,44$ a délku $\{\overline{EG}; \overline{EF}\} = \{195,1; 132,1\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ E} = \frac{m_{180^\circ \overline{EG}} + m_{180^\circ \overline{EF}}}{2} = \frac{0,54 + 0,56}{2} = 0,55$$

$$\overline{m}_{90^\circ E} = \frac{m_{90^\circ \overline{EG}} + m_{90^\circ \overline{EF}}}{2} = \frac{0,51 + 0,53}{2} = 0,52$$

$$\begin{aligned} m_{115^\circ E} &= \frac{\overline{m}_{180^\circ E} - \overline{m}_{90^\circ E}}{90} \cdot \alpha_E + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ E} - \overline{m}_{180^\circ E} \\ &= \frac{0,55 - 0,52}{90} \cdot 115 + 2 \cdot 0,52 - 0,55 = 0,53 \end{aligned}$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_E = \frac{2 \cdot R_{bE}}{D_{0RE}} \geq m_{115^\circ E}$$

$$m_E = \frac{2 \cdot 65}{181,2} = 0,72 \geq 0,53$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

b) Výpočet pro roh F (viz obr. 36)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RF} = 2 \cdot \sqrt{R_{bF}^2 + 2 \cdot R_{bF} \cdot H_F - 0,85 \cdot R_{bF} \cdot R_{dF} - 0,14 \cdot R_{dF}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 35 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 181,2 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_F = 105,7^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RF}} \cdot 100 = \frac{0,8}{181,2} \cdot 100 = 0,44$ a délku $\{\overline{FG}; \overline{FE}\} = \{183,7; 132,1\}$ mm:

$$\overline{m}_{180^\circ F} = \frac{m_{180^\circ FG} + m_{180^\circ FE}}{2} = \frac{0,54 + 0,56}{2} = 0,55$$

$$\overline{m}_{90^\circ F} = \frac{m_{90^\circ FG} + m_{90^\circ FE}}{2} = \frac{0,51 + 0,53}{2} = 0,52$$

$$m_{105,7^\circ F} = \frac{\overline{m}_{180^\circ F} - \overline{m}_{90^\circ F}}{90} \cdot \alpha_F + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ F} - \overline{m}_{180^\circ F}$$

$$= \frac{0,55 - 0,52}{90} \cdot 105,7 + 2 \cdot 0,52 - 0,55 = 0,53$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_F = \frac{2 \cdot R_{bF}}{D_{0RF}} \geq m_{105,7^\circ F}$$

$$m_F = \frac{2 \cdot 65}{181,2} = 0,72 \geq 0,53$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

c) Výpočet pro roh G (viz obr. 36)

Pro tento výpočet je nejprve podle rovnice 3.6 nutno vypočítat redukovaný průměr přístřihu pro daný roh, tedy:

$$D_{0RG} = 2 \cdot \sqrt{R_{bG}^2 + 2 \cdot R_{bG} \cdot H_G - 0,85 \cdot R_{bG} \cdot R_{dG} - 0,14 \cdot R_{dG}^2}$$

$$= 2 \cdot \sqrt{65^2 + 2 \cdot 65 \cdot 35 - 0,85 \cdot 65 \cdot 10 - 0,14 \cdot 10^2} = 181,2 \text{ mm}$$

Dále je potřeba znát střední součinitel tažení m_s . Ten je na základě kapitoly 3.3 zvolen 0,80. A kritický součinitel tažení pro daný roh, spočítaný podle postupu, uvedeného v kapitole 3.3, tedy pro úhel $\alpha_G = 139,3^\circ$, poměr $\frac{t}{D_{0RG}} \cdot 100 = \frac{0,8}{181,2} \cdot 100 = 0,44$ a délku $\{\overline{GE}; \overline{GF}\} = \{195,1; 183,7\} \text{ mm}$:

$$\overline{m}_{180^\circ G} = \frac{m_{180^\circ \overline{GE}} + m_{180^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,54 + 0,54}{2} = 0,44$$

$$\overline{m}_{90^\circ G} = \frac{m_{90^\circ \overline{GE}} + m_{90^\circ \overline{GF}}}{2} = \frac{0,51 + 0,51}{2} = 0,51$$

$$m_{139,3^\circ G} = \frac{\overline{m}_{180^\circ G} - \overline{m}_{90^\circ G}}{90} \cdot \alpha_G + 2 \cdot \overline{m}_{90^\circ G} - \overline{m}_{180^\circ G}$$

$$= \frac{0,44 - 0,51}{90} \cdot 139,3 + 2 \cdot 0,51 - 0,44 = 0,47$$

Pak pro zhotovení řešeného rohu na 1 tah musí být součinitel tažení vyšší než kritický součinitel tažení daného rohu, tedy:

$$m_G = \frac{2 \cdot R_{bG}}{D_{0RG}} \geq m_{139,3^\circ G}$$

$$m_G = \frac{2 \cdot 65}{181,2} = 0,72 \geq 0,47$$

Jelikož je výše uvedená podmínka splněna, lze řešený roh zhotovit na 1 tah.

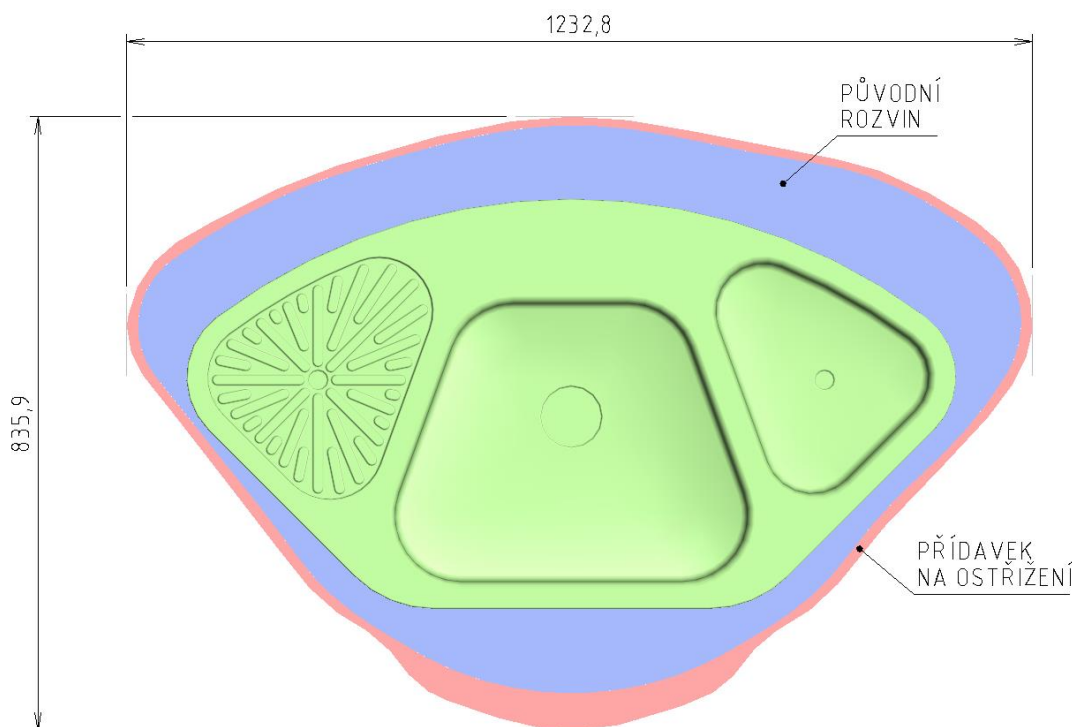
Na základě výše uvedených výpočtů lze usuzovat, že vedlejší drez lze zhotovit na 1 tah.

Pro rohy hlavního drezu, tedy rohy A – D jsou výsledky stejné, jako v kapitole 4.4.

- Konečný výrobní postup a volba přídavek na ostřížení

Výrobní postup zůstává stejný, jako v kapitole 4.3. Z důvodu změny geometrie drezu se změnila i geometrie polotovaru a přídavek.

Přídavky byly zvoleny na základě [10] a to 3 % pro 1 tah + vyšší přídavek v přední části hlavního drezu (viz obr. 40), z důvodu chybějícího materiálu, zjištěného na základě simulace v kapitole 4.3.



Obr. 40 Rozvinutý tvar výtažku s přídavkem na ostřížení – 3. verze

- Užití přidržovače

Z důvodu změn velikostí přidržovaných ploch, byl proveden přepočítání přidržovací síly v jednotlivých operacích, při zachování stejného měrného tlaku, jako v kapitole 4.4, tedy $p_p = 2 \text{ MPa}$.

Pak přidržovací síla pro 1. operaci je vypočtena na základě obecně známého vztahu:

$$F_{p1} = p_p \cdot S_{p2} = 2 \cdot 547054 = 1,1 \text{ MN}$$

A pro druhou operaci:

$$F_{p2} = p_p \cdot S_{p2} = 2 \cdot 410182 = 0,8 \text{ MN}$$

Pro lemování je síla stejná, jako v kapitole 4.4.

- Parametry tažidla

Parametry tažidla zůstávají neměnné oproti kapitole 4.4.

- Parametry tažení

Parametry tažení zůstávají stejné, jako v kapitole 4.4.

- Tažná síla a práce

Z důvodu změn geometrie dřezu byl proveden přepočítání práce pro 2. tažnou operaci, tedy:

$$A_{t2} \approx F_{c2} \cdot C_3 \cdot h_2 = 168600 \cdot 0,8 \cdot 0,035 = 4,7 \text{ kJ}$$

Ostatní výsledky jsou oproti kapitole 4.4 nezměněné.

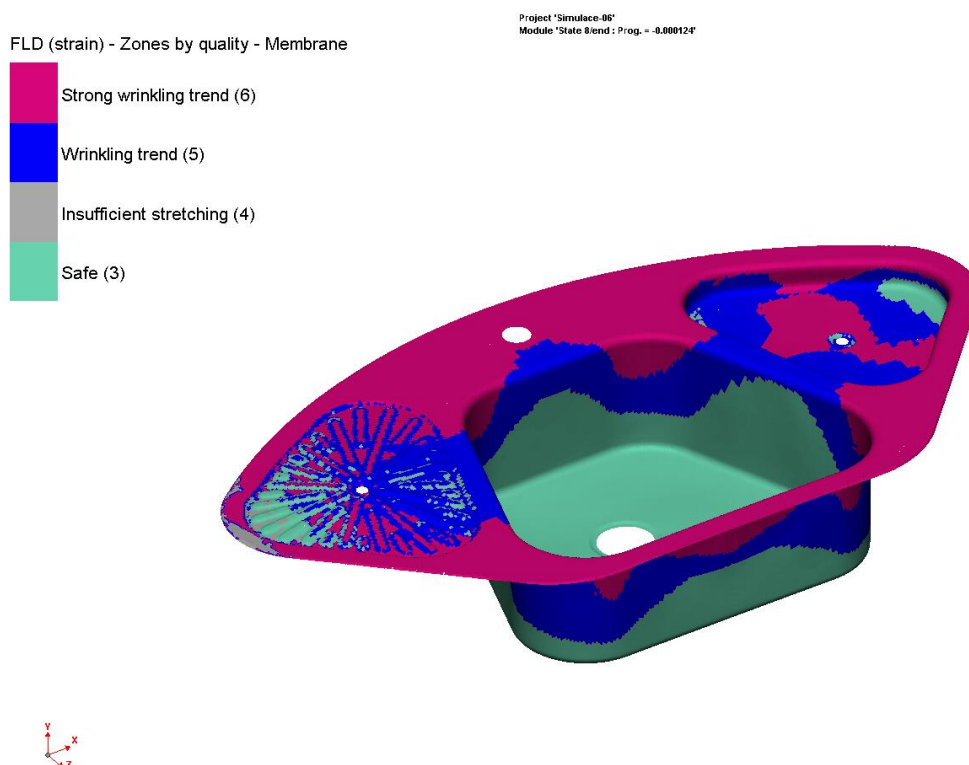
- Numerická simulace

Pro kontrolu výše uvedených výpočtů a možnosti táhnout dřež v jednotlivých tažných operacích na 1 tah, byla provedena numerická simulace respektující výše uvedené parametry tažidla, tažení a materiálu.

S výjimkou importované geometrie byly všechny ostatní parametry zachovány, jako v kapitole 4.3.

Na základě výsledků uvedených na obrázku 41 a v příloze 12 lze konstatovat, že nebylo dosaženo mezního stavu přetvoření, tedy stavu, při kterém je již možné očekávat vznik trhlin. 3. verzi dřezu je tedy možné zhotovit v jednotlivých operacích na 1 tah. I když se přibližně polovina dřezu nachází v oblasti se silným rizikem vzniku zvlnění, tak vlivem použití přidržovače k žádnému zvlnění nedošlo.

Je potřeba vzít v potaz, že numerické simulace obecně nabízí pouze přibližné řešení, které je ovlivněno kvalitou a množstvím vstupních informací a dále přesností, s jakou daný software počítá. Z těchto důvodů je experiment, provedený za reálných podmínek nenahraditelný a mnohem více určující.



Obr. 41 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD – 3. verze

V příloze 13 je možné pozorovat výslednou tloušťku stěn výtažku, jejíž minimum se nachází na hodnotě 0,54 mm a maximum na 1,02 mm. Nejvýraznější ztenčení je možno pozorovat v rozích hlavního dřezu. V oblasti vedlejšího dřezu a okapnice zůstala tloušťka přibližně stejná, jako u výchozího polotovaru.

V příloze 14 je možno pozorovat závislost tažné síly na dráze tažníku, kde je patrné maximum tažné síly kolem 550 kN, následované kalibrací při síle přibližně 620 kN. Numerickou integrací této závislosti byla obdržena tažná práce pro 1. operaci, tedy 68,9 kJ.

Příloha 15 zobrazuje závislost tažné a lisovací síly v závislosti na dráze tažníku/lisovníku, kde do hloubky 34 mm probíhá tažení (s maximální silou kolem 250 kN) a od této hloubky se

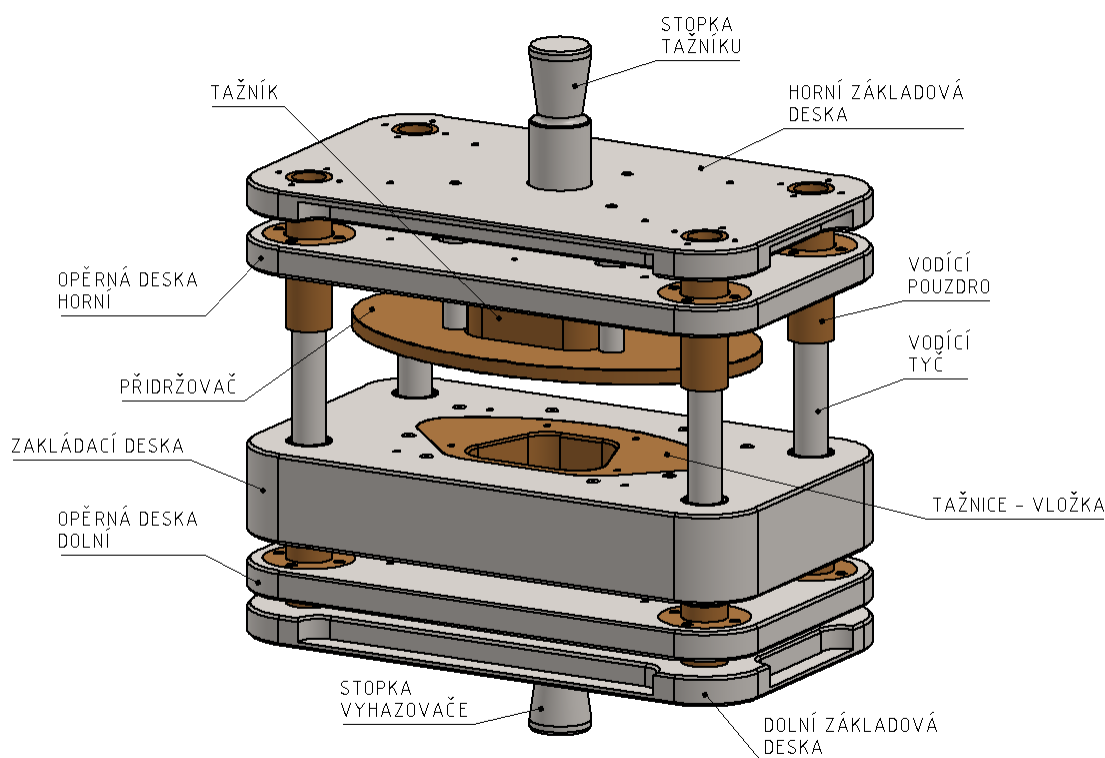
jedná o kombinace tažení, kalibrace a lisování s maximem na hodnotě přibližně 550 kN. Numerickou integrací této závislosti byla obdržena tažná práce pro 2. operaci, tedy 5,7 kJ.

V příloze 16 je možné vidět závislost lemovací síly na dráze lemovníku, kde maximum lemovací síly se nachází přibližně na hodnotě 130 kN. Opět numerickou integrací této závislosti byla obdržena tažná práce pro lemování, tedy 0,5 kJ.

4.6 Konstrukce tažidla a volba lisu [39], [40], [41], [42], [43]

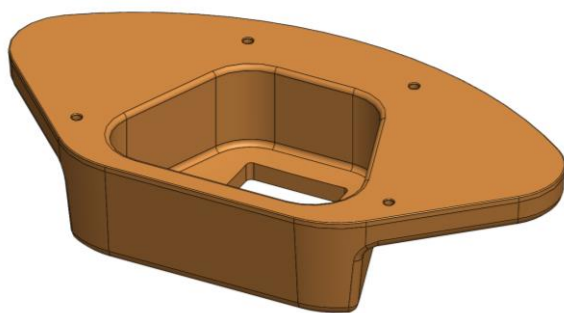
Vzhledem k velkým rozměrům a tvarové složitosti výtažku byl tažný nástroj konstruován jako univerzální, to jest, že výměnou tažnice, která má podobu vložky, tažníku a přidržovače lze na daném nástroji provádět všechny tři tvářecí operace (tažení hlavního dřezu, tažení vedlejšího dřezu a lemování). Další výhodou této univerzálnosti je i to, že pro výrobu dřezu nejsou potřeba 3 nástroje a 3 lisy, ale stačí pouze 1 nástroj a 1 lis, kde se bude nejprve zhotovovat jedna operace a hotové díly se budou zatím odkládat do mezioperačního skladu, aby po „přestavbě“ nástroje sloužili jako polotovary pro 2. operaci.

Konfigurace nástroje pro 1. operaci je zobrazena na obrázku níže.

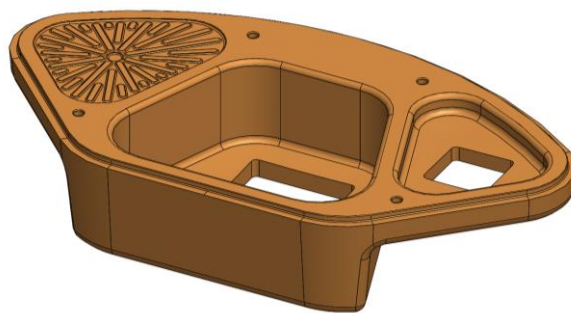


Obr. 42 Schéma tažidla v konfiguraci pro 1. tažnou operaci

Tažidlo se sestává z masivní zakládací desky, která je v průběhu tažení nehybná a do které se vkládají v závislosti na konfiguraci vložky tažnice. Těch jsou celkem 2 typy. První typ je zobrazen na obrázku 42, respektive na obrázku 43 a je určen pro 1. operaci a 2. typ je vyobrazen na obrázku 44. a je určen pro 2. operaci a pro lemování.

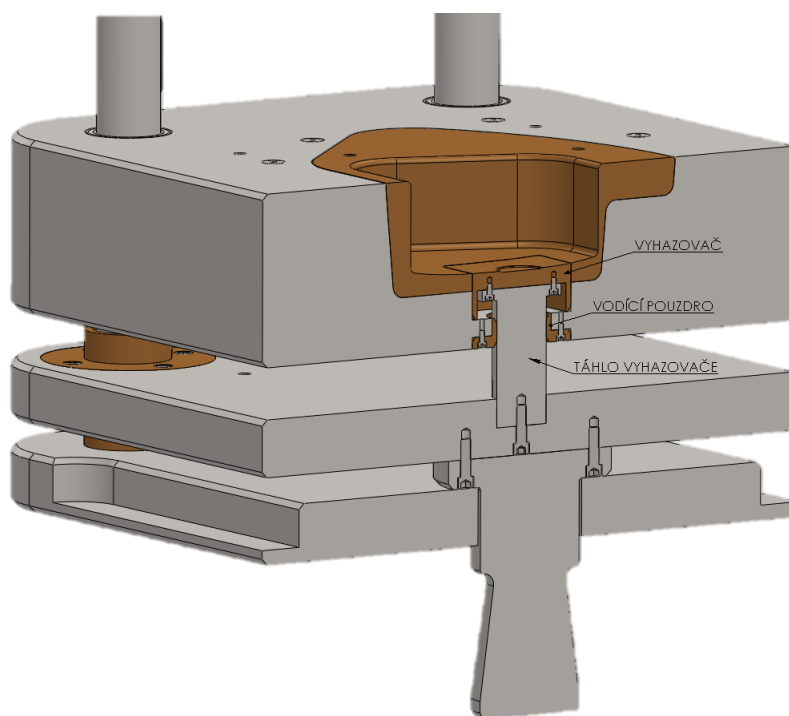


Obr. 43 Tažnice pro 1. operaci



Obr. 44 Tažnice pro 2. operaci a pro lemování

V horní části tažnic jsou otvory, sloužící jednak z upevnění tažnice do základací desky pomocí šroubů a dále pro zašroubování ok pro jeřáb. U tažnice pro 2. operaci je po obvodu vytvořena drážka, který umožňuje její využití i pro lemování. Na dně hlavního a vedlejšího dřezu jsou čtvercové otvory, určené pro vyhazovač. Čtvercový otvor zabráňuje rotaci vyhazovače a vůle mezi tažnicí a vyhazovačem zajišťuje snadný odvod přebytečného vzduchu během tažení, stejně jako snažíš přisun, v případě vyjmutí. Vyhazovač je uchycen pomocí táhla, které chodí ve vodícím pouzdře, upevněný k dolní opěrné desce, která je uchycena k stopce vyhazovače (viz obr. 45).



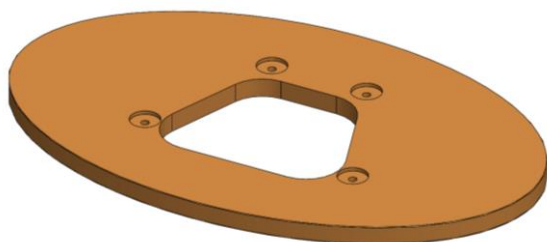
Obr. 45 Schéma vyhazovače hlavního dřezu

Celá deska se pak může působením lisu zvedat a zároveň pohybovat vyhazovačem v hlavním, případně v 2. operaci a lemování i vedlejším vyhazovačem, jehož konstrukce je stejná, jako v případě hlavního vyhazovače.

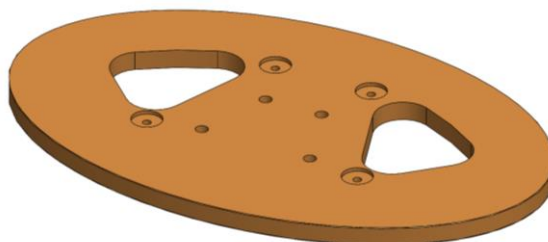
Dolní a horní základová deska je upevněna k lisu pomocí upínek v T-drážkách. Do dolní základové desky je upevněna vodící tyč, která prostupuje přes všechny desky a slouží k vedení jednotlivých desek kluzným mechanismem skrz vodící pouzdra.

Horní základová deska slouží pro přidržovač, na který je přenášen pohyb/síla skrz táhla, která prostupují skrz horní opěrnou desku přímo k přidržovači. Ke zhotovení dřezu jsou k dispozici celkem 3 typy přidržovačů a 1 vložka (viz obrázky níže).

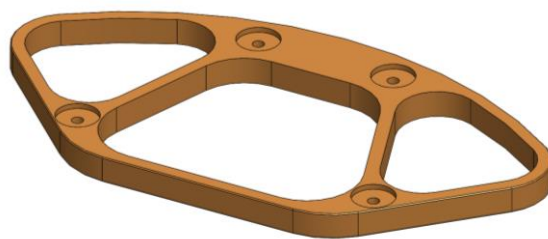
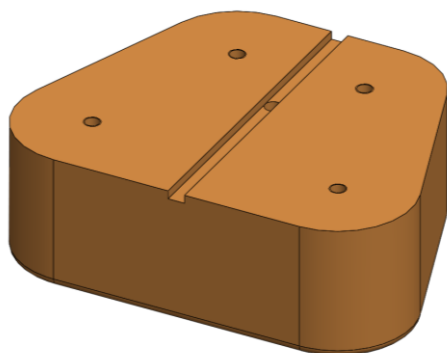
Vložka (viz obrázek 48) se připevňuje k přídržovači pro 2. operaci (viz obrázek 47) pomocí šroubů a zabraňuje přesunu materiálu z hlavního dřezu do vedlejšího a tedy jeho nechtěné deformaci během 2. operace. Otvory v jednotlivých přídržovačích pak slouží pro průchod tažníku a drážka ve vložce přídržovače pro 2. tažnou operaci s dírou uprostřed slouží ke snazšímu odvodu vzduchu během tažení a ke snazšímu přívodu v případě vytahování tažníku.



Obr. 46 Přídržovač pro 1. operaci



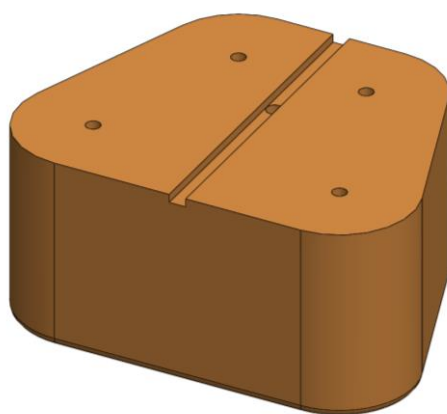
Obr. 47 Přídržovač pro 2. operaci



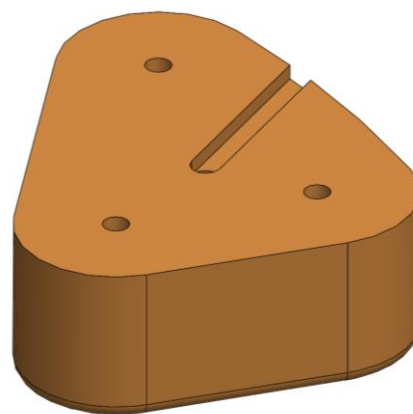
Obr. 49 Přídržovač pro lemování

Obr. 48 Vložka přídržovače pro 2. operaci

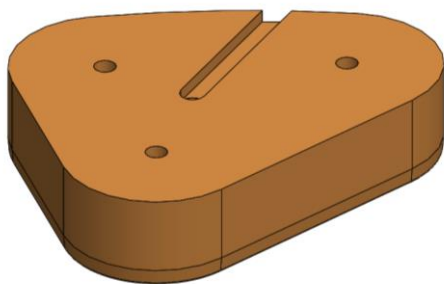
Tažník je upevněný šrouby k horní opěrné desce, která je připevněna ke stopce tažníku. Pro výrobu dřezu jsou k dispozici 3 typy tažníků (1 pro 1. operaci, 2 pro 2. operaci) a jeden nástroj pro lemování (viz obrázky níže).



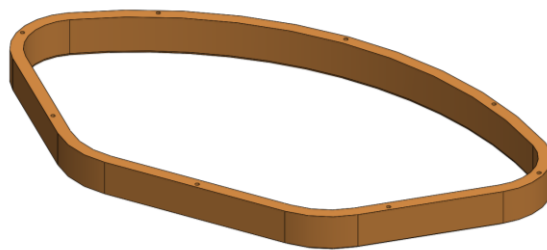
Obr. 50 Tažník pro 1. operaci



Obr. 51 Tažník pro tažení vedlejšího dřezu v 2. operaci



Obr. 52 Tažník pro lisování okapnice v 2. operaci



Obr. 53 Lemovací nástroj

Podobně jako vložka přidržovače pro 2. operaci mají i jednotlivé tažníky drážky a provrtané otvory pro snadný odvod/přívod vzduchu během tažení.

Funkční části tažidla a vodící pouzdra jsou z bronzu CuSn8, který má dle [41] a [42] vysokou pevnost ($R_m = 440 \text{ MPa}$), korozivzdornost a dobré kluzné vlastnosti a je vhodný především pro kluzná vodící pouzdra. Tišnovský pak na základě tabulky 8 doporučuje použití bronzu pro velmi hluboké výtažky, což možná u řešené součásti úplně neplatí, ale vzhledem k tvarové složitosti je použití bronzu oprávněné. Ostatní části tažidla jsou z konstrukční oceli S235JR.

Tvar stopek je definován normou ČSN ISO 10242-2 [43]. Odlišnosti oproti této normě jsou v délce stopek a tvaru/rozměrech příruby.

Vzhledem k velkým rozměrům a hmotnosti tažidla, stejně jako požadavku na trojčinný hydraulický lis s vysokou tažnou a přidržovací silou, je nabídka možných strojů značně omezená. Při výběru vhodného stroje bylo hledáno především mezi lokálními výrobci, a to konkrétně u firmy Žďas, a.s. a firmy Dieffenbacher CZ hydraulické lisy, s.r.o.

Na internetových stránkách firmy Žďas [39] bohužel nebyl nalezen žádný katalog ani reference vyráběných lisů. Na internetových stránkách firmy Dieffenbacher [40] byl nalezen katalog realizovaných projektů, ze kterého je možné čerpat základní informace. Oběma těmito firmám byl zaslán e-mail s žádostí o nějaký podrobnější katalog, bohužel zatím bez odpovědi.

Požadavky na lis jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 12 Požadavky na hydraulický lis

Veličina	Požadovaná hodnota
Zdvih	350 mm
Rozměry stolu (upínací plocha)	2100x1300 mm
Sevřená výška	1520 mm
Tvářecí síla	700 kN
Přidržovací síla	1000 kN
Tvářecí rychlost	$7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 116,7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Na základě výše uvedených požadavků a na základě katalogu firmy Dieffenbacher bylo zjištěno, žádný z referovaných lisů nesplňuje výše uvedené požadavky. Jediný trojčinný lis v uvedeném katalogu, označený jako PO 160/100 by šlo po drobných úpravách (především v oblasti upínací plochy a svěrné výšky) použít. Bližší informace o tomto stroji jsou uvedeny v příloze 17.

4.7 Technicko-ekonomické zhodnocení

Předmětem níže uvedeného technicko-ekonomického zhodnocení je určení tzv. bodu zvratu, při kterém jsou celkové výrobní náklady na jeden kus dřezu stejné při použití varianty 1 stroj, 1 nástroj, nebo varianty 3 stroje, 3 nástroje, jak bylo uvedeno v kapitole 4.6.

U varianty 1 stroj, 1 nástroj jsou výhodou nižší pořizovací náklady na vybavení ovšem oproti variantě 3 stroje, 3 nástroje je tu také nutnost vysoké kapacity mezioperačního skladu, kam se budou výrobky z jednotlivých operací dočasně ukládat, než dojde k „přestavbě“ nástroje na jinou tvářecí operaci, což s sebou nese další časové ztráty.

Výrobní čas jednoho kusu, tedy tzv. jednotkový čas t_j je součtem času hlavního t_{jh} , tedy času, během kterého dochází k tváření, dále času vedlejšího (manipulačního) t_{jv} , který je dán dobou přemístění polotovaru do nástroje, jeho uchycení a následném vyjmutí a přemístění na paletu a nakonec časem ztrátovým t_{jz} , který zohledňuje například vyčištění nástroje atd., tedy:

$$t_j = t_{jh} + t_{jv} + t_{jz} \text{ [s]} \quad (4.1)$$

Kde čas hlavní t_{jh} je možno vypočítat na základě znalosti výšky zdvihu nástroje H_z a tvářecí rychlosti stroje v_t podle všeobecně známého vztahu:

$$t_{jh} = \frac{H_z}{v_t} \text{ [s]} \quad (4.2)$$

Jelikož však samotná výroba neprobíhá většinou po kusech, ale po tzv. dávkách, tedy např. po množství kusů n_{kd} , které se vejdu na jednu paletu, zavádí se tzv. dávkový čas t_d , který je podobně jako jednotkový čas definován součtem času hlavního, který tu ovšem představuje čas jednotkový t_j , násobený počtem kusů v jedné dávce n_{kd} , dále čas vedlejší t_{dv} , tedy čas převozu materiálu z předchozí operace (pozn.: pro výpočet je uvažováno, že zaměstnanec si vždy doveze materiál z předchozí operace, do další operace jej již nepřeváží, vyzvedne si jej pracovník z další operace), včetně času „přestavby“ nástroje (v případě varianty 1 stroj, 1 nástroj) A nakonec čas ztrátový t_{dz} , který uvažuje přípravu stroje, čištění, mazání, odskočení zaměstnance na WC, atd. a to celé vynásobeno počtem operací, prováděných na jednom stroji, nutných ke zhotovení dřezu¹⁶ n_{op} Tedy:

$$t_d = n_{op} \cdot (t_j \cdot n_{kd} + t_{dv} + t_{dz}) \text{ [s]} \quad (4.3)$$

Většina podniků pracuje na směny, z toho důvodu je možné zavést tzv. směnový čas t_s , který analogicky jako u výše uvedených vztahů je definován jako součet času hlavního, který tu představuje součin dávkového času t_d a počet dávek v jedné směně n_{ds} , dále čas vedlejší t_{sv} , pod kterým si lze představit příprava pracoviště na směnu, kontrola stroje, nástroje, mazání a po konci směny i úklid a opět čas ztrátový t_{sz} . Tedy:

$$t_s = t_d \cdot n_{ds} + t_{sv} + t_{sz} \text{ [s]} \quad (4.4)$$

Jelikož čas směny t_s bývá pevně dán, lze na základě jeho znalosti určit počet dávek v jedné směně, tedy:

¹⁶ Pro variantu 1 stroj, 1 nástroj $n_{op} = 3$, pro variantu 3 stroje, 3 nástroj $n_{op} = 1$.

$$n_{ds} = \frac{t_s - t_{sv} - t_{sz}}{t_d} \text{ [ks]} \quad (4.5)$$

Pak celkové náklady na výrobu jednoho kusu N lze vypočítat jako součet nákladů na mzdy, materiál¹⁷ N_{mat} , stroj(e) N_{str} , nástroj(e) N_{nst} , údržbu stroje/ů¹⁸ N_{ust} a údržbu nástroje/ů¹⁹ N_{uns} a ostatní²⁰ N_{ost} . Tedy:

$$N = \frac{t_s}{n_{kd} \cdot n_{ds}} \cdot \frac{\overline{N_{mzd}}}{3600} + N_{mat} + \frac{N_{str} + N_{nst}}{n_v} + N_{ust} + N_{uns} + N_{ost} \text{ [Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (4.6)$$

kde: $\overline{N_{mzd}}$ – průměrná hodinová mzda dělníka/ů [Kč · hod⁻¹],
 n_v – celkový počet vyrobených kusů [ks].

Aplikací výše uvedených vztahů lze vypočítat bod zvratu pro jednotlivé varianty při uvažování níže uvedených zvolených/odhadnutých parametrů zadání.

V tabulce níže jsou uvedeny parametry pro výpočet nákladů na výrobu 1 ks při použití varianty 1 stroj a 1 nástroj.

Tab. 13 Zvolené/odhadnuté parametry pro výpočet nákladů varianty 1 stroj, 1 nástroj

Veličina	Zvolená/odhadnutá hodnota	Odůvodnění
t_{jv}	20 s	
t_{jz}	5 s	
t_{dv}	600 s = 10 min	Včetně času „přestavby“ nástroje
t_{dz}	120 s = 2 min	
t_s	28 800 s = 8 hod	Standardní délka směny
t_{sv}	1 200 s = 20 min	
t_{sz}	300 s = 5 min	
n_{kd}	20 ks	
$\overline{N_{mzd}}$	150 Kč · hod ⁻¹	1 dělník na 1 stroj na 3 operace
N_{mat}	300 Kč	
N_{str}	10 000 000 Kč	
N_{nst}	2 400 000 Kč	Při uvažované ceně 200 Kč/kg hmotnosti nástroje je pak při hmotnosti necelých 12 tun 200 x 12 000
N_{ust}	20 Kč	
N_{uns}	310 Kč	Při odhadované životnosti 5 000 ks, při 3 operacích na 1 nástroj, pak náklady na pořízení nových funkčních částí nástroje na kus = 500 000/(5 000/3) = 300 Kč + 10 Kč na případné renovace a opravy.
N_{ost}	10 Kč	

¹⁷ Součástí nákladů na materiál je i cena za předchozí zpracování, mazivo, přepravu, atd.

¹⁸ Součástí nákladů na údržbu stroje/ů není uvažována cena za pořízení nového stroje v případě konce životnosti, protože nelze předpokládat, že by výroba zadaného dřezu probíhala po celou dobu životnosti daného stroje (v řádu několika let).

¹⁹ Součástí nákladů na údržbu nástroje/ů je i cena za renovace a za pořízení nového nástroje při dosažení konce životnosti.

²⁰ Součástí ostatních nákladů jsou například ceny energií.

Na základě konstrukce nástroje (viz kapitola 4.6) a zvolené tažné rychlosti (viz kapitola 4.3) byl vypočten hlavní jednotkový čas podle rovnice 4.2, tedy:

$$t_{jh} = \frac{H_z}{v_t} = \frac{0,35}{\frac{7}{60}} = 3 \text{ s}$$

Pak dosazením do rovnice 4.1 je jednotkový čas na výrobu jednoho kusu:

$$t_j = t_{jh} + t_{jv} + t_{jz} = 3 + 20 + 5 = 28 \text{ s}$$

Dosazením do rovnice 4.3 je dávkový čas na výrobu 20 ks ve 3 operacích:

$$t_d = n_{op} \cdot (t_j \cdot n_{kd} + t_{dv} + t_{dz}) = 3 \cdot (28 \cdot 20 + 600 + 120) = 3840 \text{ s} = 64 \text{ min}$$

Pak podle rovnice 4.5 počet dávek v jedné směně:

$$n_{ds} = \frac{t_s - t_{sv} - t_{sz}}{t_d} = \frac{28800 - 1200 - 300}{3840} = 7,1 \text{ dávek} = 142 \text{ ks}$$

Pak funkce nákladů na jeden kus při variantě 1 stroj, 1 nástroj v závislosti na vyrobeném množství je podle rovnice 4.6:

$$N_{1,1} = \frac{t_s}{n_{kd} \cdot n_{ds}} \cdot \frac{\overline{N_{mzd}}}{3600} + N_{mat} + \frac{N_{str} + N_{nst}}{n_v} + N_{ust} + N_{uns} + N_{ost}$$

$$= \frac{28800}{20 \cdot 7,1} \cdot \frac{150}{3600} + 300 + \frac{10000000 + 2400000}{n_v} + 20 + 310 + 10$$

Pro výpočet nákladů na výrobu 1 ks při použití varianty 3 stroje, 3 nástroje jsou parametry výpočtu uvedeny v tabulce níže.

Tab. 14 Zvolené/odhadnuté parametry pro výpočet nákladů varianty 3 stroje, 3 nástroje

Veličina	Zvolená/odhadnutá hodnota	Odůvodnění
t_{jv}	20 s	
t_{jz}	5 s	
t_{dv}	300 s = 5 min	
t_{dz}	120 s = 2 min	
t_s	28 800 s = 8 hod	Standardní délka směny
t_{sv}	1 200 s = 20 min	
t_{sz}	300 s = 5 min	
n_{kd}	20 ks	
$\overline{N_{mzd}}$	450 Kč · hod ⁻¹	3 dělníci (každý 150 Kč/hod) na 3 stroje po 1 operaci = 3 x 150
N_{mat}	300 Kč	
N_{str}	30 000 000 Kč	3 x 10 000 000 Kč
N_{nst}	7 200 000 Kč	Při uvažované ceně 200 Kč/kg hmotnosti nástroje je pak při hmotnosti necelých 12 tun 200 x 12 000 x 3
N_{ust}	60 Kč	3 stroje, každý po 20 Kč

N_{uns}	330 Kč	Při odhadované životnosti 5 000 ks, při 3 operacích na 3 nástroje, pak náklady na pořízení nových funkčních částí nástroje na kus = $(500\,000/5\,000) \times 3 = 300$ Kč + 3 x 10 Kč na případné renovace a opravy.
N_{ost}	10 Kč	

Hlavní jednotkový čas je stejný, jako v případě varianty 1 stroj, 1 nástroj, tedy $t_{jh} = 3$ s. Jednotkový čas je tedy také stejný $t_j = 28$ s.

Dosažením do rovnice 4.3 je dávkový čas na výrobu 20 ks ve 3 operacích vždy na jednom stroji:

$$t_d = n_{op} \cdot (t_j \cdot n_{kd} + t_{dv} + t_{dz}) = 1 \cdot (28 \cdot 20 + 300 + 120) = 980 \text{ s} = 16,3 \text{ min}$$

Pak podle rovnice 4.5 počet dávek v jedné směně:

$$n_{ds} = \frac{t_s - t_{sv} - t_{sz}}{t_d} = \frac{28800 - 1200 - 300}{980} = 27,9 \text{ dávek} = 558 \text{ ks}$$

Pak funkce nákladů na jeden kus při variantě 3 stroje, 3 nástroje v závislosti na vyrobeném množství je podle rovnice 4.6:

$$N_{3,3} = \frac{t_s}{n_{kd} \cdot n_{ds}} \cdot \frac{\overline{N_{mzd}}}{3600} + N_{mat} + \frac{N_{str} + N_{nst}}{n_v} + N_{ust} + N_{uns} + N_{ost}$$

$$= \frac{28800}{20 \cdot 27,9} \cdot \frac{450}{3600} + 300 + \frac{30000000 + 7200000}{n_v} + 60 + 330 + 10$$

Postavením $N_{1,1} = N_{3,3}$ a vyjádřením n_v bylo obdrženo výrobní množství na bodu zvratu, tedy:

$$\frac{28800}{20 \cdot 7,1} \cdot \frac{150}{3600} + 300 + \frac{10000000 + 2400000}{n_v} + 20 + 310 + 10$$

$$= \frac{28800}{20 \cdot 27,9} \cdot \frac{450}{3600} + 300 + \frac{30000000 + 7200000}{n_v} + 60 + 330 + 10$$

$$\frac{46040}{71} + \frac{12400000}{n_v} = \frac{21900}{31} + \frac{37200000}{n_v}$$

$$n_v = \frac{37200000 - 12400000}{\frac{46040}{71} - \frac{21900}{31}} < 0 \text{ ks}$$

Z výše uvedeného vyplývá, že bod zvratu neexistuje v oboru kladných čísel, z toho tedy plyne, že varianta 1 stroj, 1 nástroj je vždy ekonomicky výhodnější, než varianta 3 stroje, 3 nástroje, nezávisle na výrobním množství n_v .

Minimální možný rozdíl obou variant je pak:

$$\begin{aligned}
 \lim_{n_v \rightarrow \infty} N_{3,3} - N_{1,1} &= \left[\frac{28800}{20 \cdot 27,9} \cdot \frac{450}{3600} + 300 + \frac{30000000 + 7200000}{\infty} + 60 + 330 + 10 \right] \\
 &- \left[\frac{28800}{20 \cdot 7,1} \cdot \frac{150}{3600} + 300 + \frac{10000000 + 2400000}{\infty} + 20 + 310 + 10 \right] \\
 &= \left[\frac{28800}{20 \cdot 27,9} \cdot \frac{450}{3600} + 300 + 0 + 60 + 330 + 10 \right] \\
 &- \left[\frac{28800}{20 \cdot 7,1} \cdot \frac{150}{3600} + 300 + 0 + 20 + 310 + 10 \right] = \frac{21900}{31} - \frac{46040}{71} = 58 \text{ Kč}
 \end{aligned}$$

Z hlediska produkce je však varianta 3 stroje, 3 nástroje výhodnější, protože zatímco u varianty 1 stroj, 1 nástroj se během směny vyrobí průměrně 142 kusů dřezu, tak v případě varianty 3 stroje, 3 nástroje to je v průměru 558 kusů, tedy téměř 4x více.

Výše uvedené výpočty jsou však postaveny na odhadnutých/zvolených vstupních parametrech a mohou se v reálu lišit.

5 ZÁVĚRY

Předkládaná práce se zabývala návrhem výroby tvarově složitého rohového dřezu z 0,8 mm plechu z austenitické korozivzdorné oceli 1.4301. V úvodní analýze možností výroby zadané součásti byly porovnány jednotlivé varianty, probrány jejich výhody a nevýhody pro danou aplikaci, z čehož nakonec vyšla nejvýhodnější varianta výroby v několika tažných operacích pomocí konvenčního nástroje, což je v souladu se zadáním této diplomové práce.

Teoretická část práce podrobněji rozebrala problematiku konvenčního tažení tvarově složitých součástí a to z hlediska materiálové, napjatostně-deformační, dále problematiku samotného návrhu postupu výroby, jakož i parametrů nástroje a samotného tažení.

V praktické části došlo nejprve ke kontrole technologičnosti, kde byly nastíněny možné problémy z důvodu komplikované geometrie zadané součásti, dále byla probrána vhodnost použitého materiálu a geometrické parametry (především poloměr zaoblení u dna a u příruby). Byl nastíněn postup výroby, který se sestával ze tří tažných operací. V další části byl pro jednotlivé tažné operace stanoven počet tahů, ke zhotovení požadované geometrie, a to buď na základě maximální hloubky, dosažitelné v prvním tahu, nebo na základě kritického součinitele tažení pro jednotlivé rohy výtažku. Použitím kritéria maximální dosažitelné hloubky v prvním tahu byly analyzované části dřezu shledány jako vyrobitelné na jeden tah. Použitím kritéria kritických součinitelů tažení byla velká část dřezu vyrobitelná na dva tahy. Jelikož se obě kritéria rozcházela, tak vzhledem k tomu, že řešená součást nemá striktně zadanou geometrii, tak bylo ekonomicky výhodnější upravit geometrii zadané součásti tak, aby ji bylo možné zhotovit v jednotlivých operacích na jeden tah, při zachování funkčnosti. Při znalosti počtu tahů v jednotlivých tažných operacích bylo možné stanovit přídavky na ostřížení, stanovit parametry tažidla a tažení, určit přidržovací a tažnou sílu a práci.

Pro verifikaci výše uvedených výpočtů byla provedena numerická simulace, u které došlo k meznímu stavu v rozích hlavního a vedlejšího dřezu. Z těchto důvodů byla geometrie dřezu upravena (došlo k zvětšení poloměru zaoblení v rozích), načež byl proveden přepoččet všech parametrů a byla provedena druhá simulace. U druhé simulace došlo k meznímu stavu již pouze v rozích vedlejšího dřezu, z toho důvodu byla geometrie dřezu opět upravena (byla snížena hloubka vedlejšího dřezu), opětovně došlo k přepočtení jednotlivých parametrů, kde tažná síla pro tažení hlavního dřezu vyšla okolo 260 kN a tažná práce 35,8 kJ, pro tažení vedlejšího dřezu 168,6 kN a tažná práce 7,4 kJ, pro lisování okapnice 1,1 MN a lisovací práce 5,3 kJ. Takto upravená geometrie byla opět podrobena numerické simulaci, při které nebylo dosaženo mezního stavu, tedy takový tvar dřezu již lze teoreticky vyrábět. Tažná síla pro tažení hlavního dřezu vyšla na základě simulace okolo 620 kN a práce 68,9 kJ. Tažná síla pro kombinaci tažení vedlejšího dřezu a lisování okapnice vyšla okolo 550 kN a práce 5,7 kJ. Pro lemování je pak síla přibližně 130 kN a práce 0,5 kJ. Je třeba si uvědomit, že numerická simulace není realita, jedná se pouze o přiblížení, které je závislé na kvantitě a kvalitě vstupních informací. Z toho důvodu je reálný experiment, provedený za reálných podmínek vždy nejvíce určující.

Na základě validovaných výpočtů byl navržen univerzální tažidlo, na kterém je možné provádět všechny tři operace (tažení hl. dřezu, tažení vedlejšího dřezu + lisování okapnice, lemování) a to přestavbou funkčních částí nástroje.

V závěru práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, jehož předmětem bylo nalezení bodu zvratu konfigurace 1 stroj, 1 nástroj a 3 stroje, 3 nástroje. Tedy bodu, kdy se vyplatí používat jeden nástroj na jednom lisu pro provedení všech operací, nebo kdy už je vhodné vyrobit 3 nástroje a koupit 3 stroje, a pro každou operaci zvlášť. Výsledkem technicko-ekonomického zhodnocení bylo to, že nezávisle na vyrobeném množství, je varianta 1 stroj, 1 nástroj vždy výhodnější, a to za předpokladu nekonečné výrobní série o 58 Kč na jeden kus dřezu. Je třeba brát v potaz, že výpočty provedené v technicko-ekonomickém byly založeny na odhadnutých vstupních parametrech. V realu se tak může výsledek lišit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [44]

- [1] SOLDÁN, Josef. *Výroba krytu dmychadla*. Brno, 2017. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11012/65348>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Michaela Císařová.
- [2] Tetradrachm Attica 449-404 BC cropped.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, 2008 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tetradrachm_Attica_449-404_BC_cropped.jpg
- [3] Závěs nábytkový pr. 35 mm, naložený. *Uni hobby* [online]. Praha: Uni hobby, b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://eshop.unihobby.cz/technika-zelezarstvi-nabytkove-zavesy-zaves-nabytkovy-pr-35-mm-nalozeny/144023p/?gclid=EAIaIQobChMI8Ou5p6ma4gIVFc13Ch1qWwDGEAQYAiABEGleNPD_BwE
- [4] Grohe Dřezy - Set dřezu K200 a baterie BauEdge 31562SD0. *Siko* [online]. Praha: Siko, b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.siko.cz/grohe-drezy-set-drezu-k200-a-baterie-bauedge-31562sd0/p/G31562SD0?utm_source=cj_4703737&utm_medium=affiliate&utm_campaign=8024572&utm_content=Deep+link+%2F+Redirect+link&cjevent=1f9f83b276101e9811c001e0a18050b
- [5] Sada nádobí PRESIDENT, 10 dílů. *Tescoma* [online]. Proseč: Tescoma, b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://eshop.tescoma.cz/sada-nadobi-president-10-dilu>
- [6] Feron online: Materiálové normy. *Feron, a.s.* [online]. Praha: Feron, 2017 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>
- [7] Nerezová ocel 1.4301. *Inox, spol. s r. o.* [online]. Praha: Inox, 2019 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [8] X5CrNi18-10. *Bohdan Bolzano, s.r.o.* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, 2019 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyroby-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyroby-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [9] KLAČURKOVÁ, Lenka a Martin JULIŠ. *Strojírenské materiály a tepelné zpracování - přednášky*. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství, 2018.
- [10] TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLÉ. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. Knihnice technických aktualit. ISBN 80-030-0221-4.
- [11] SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření: Část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010-2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
- [12] LENFELD, Petr. Technologie plošného tváření - tažení. *Technologie II: Tváření kovů, zpracování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec - Fakulta strojní - Katedra strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů, b.r. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm
- [13] KUBÍČEK, Miroslav. Tváření: Zvláštní způsoby tváření za studena. In: *Docplayer* [online]. Brno: Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1, b.r. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9186993-Zvlastni-zpusoby-tvareni-za-studena.html>
- [14] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno:

- Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [15] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 5. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
 - [16] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. dopl. vyd., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
 - [17] SLAVÍČEK, Jiří. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Karel Němec.
 - [18] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
 - [19] VALBERG, S. *Applied metal forming: including FEM analysis*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-51823-9.
 - [20] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. 6th ed. Berlin: Springer, 2006, 405 s. ISBN 3540332162.
 - [21] NĚMEC, Karel. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství - podklady pro výuku - zimní semestr* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství - Ústav materiálových věd a inženýrství, 2012 [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf
 - [22] Anizotropie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anizotropie>
 - [23] RAGAI, Ihab, Duraid LAZIM a James NEMES. Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study: experimental and numerical study. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, **166**(1), 116-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.007>. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604010118>
 - [24] MARTINEC, Jiří, Zdeněk ŠVEIDLER a Jiří JANOVEC. Korozivzdorné materiály: Základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. *Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, c2002-2019 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
 - [25] MARCINIAK, Zdzislaw, John DUNCAN a S. HU. *Mechanics of sheet metal forming*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 7506 5300 0.
 - [26] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
 - [27] BAREŠ, Karel, Karel DÍTĚ, Vladimír HAŠEK et al. *Lisování*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1971.
 - [28] FOREJT, Milan. Teorie tváření: Návod do cvičení. In: *Odbor technologie tváření kovů a plastů: Podklady pro cvičení* [online]. Brno, 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/hta_teorie_tvareni_navody_do_cviceni_2018_a_forejt.pdf
 - [29] ČSN 22 7303. *Tažení dutých čtyřhranných výtažků: Směrnice pro konstrukci*. Praha: ÚNM, 1967.
 - [30] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York:

Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.

- [31] SUCHY, Ivana. *Handbook of Die Design*. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. ISBN 9780071462716.
- [32] TSCHÄTSCH, Heinz. *Handbuch Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. 4., überarbeitete und erweiterte Aufl. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 1993, 351 s. Fachbuch Fertigungstechnik. ISBN 38-780-7148-5.
- [33] FOREJT, Milan. *Obrazová příloha k předmětu HVT-K*. Brno, 2019.
- [34] LUKS, Marek. Kování. *M.L. Geardesigns blog* [online]. Marek Luks, b.r. [cit. 2018-10-06]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1504/kovani>
- [35] NOVOTNÝ, Karel. Výrobní stroje a zařízení: Tvářecí stroje. In: *Odbor technologie tváření kovů a plastů: Studijní opory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství - Ústav strojírenské technologie - Odbor tváření kovů a plastů, 2019 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/hvs_vyrobní_stroje_a_zarizeni_novotny.pdf
- [36] AISI 304 (1.4301, S30400) Stainless Steel. *MekeItForm* [online]. c2009-2016 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-304-1.4301-S30400-Stainless-Steel>
- [37] QUINN, S., J. DULIEU-BARTON, J. EATON-EVANS a P. TATUM. Thermoelastic Investigation of Damage Evolution in Small Stainless Steel Pipework. *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, , 853-854 [cit. 2019-02-10]. DOI: 10.1007/978-1-4020-6239-1_424. ISBN 978-1-4020-6238-4. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6239-1_424
- [38] CAMPOS, Haroldo, Marilena BUTUC, José GRÁCIO, João ROCHA a José DUARTE. Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, **179**(1), 56-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.065>. ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606002068>
- [39] ŽĎAS [online]. Žďár nad Sázavou: ŽĎAS, 2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.zdas.com/cs/>
- [40] *Dieffenbacher CZ hydraulické lis* [online]. Brno: Dieffenbacher CZ hydraulické lis, b.r. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.dieffenbacher.cz/front_content.php
- [41] Bronz. *Alms* [online]. Modřice: Alms, 2012 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.alms-brno.cz/produkty/4-bronz/>
- [42] Bronz. *MetalCentrum* [online]. Bystřička: MetalCentru, 2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.metalcentrum.cz/sortiment/bronz/>
- [43] ČSN ISO 10242-2. *Tvářecí nástroje - Stopky - Část 2: Typ C*. b.r.
- [44] *Citace PRO* [online]. Brno, c2012-2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Veličina	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A_F	Součinitel	[–]
A_t	Tažná práce	[J]
B_F	Součinitel	[–]
C_1	Konstanta	[–]
C_2	Konstanta	[–]
C_3	Konstanta	[–]
c	Konstanta	[–]
D, d_0	Výchozí průměr kruhového přístřihu	[mm]
D_{0R}	Redukovaný průměr přístřihu plechu	[mm]
d	Průměr tažníku, vnitřní průměr výtažku	[mm]
d_i	Průměr, či jiný ekvivalentní rozměr výtažku po i-té tažné operaci	[mm]
d_n	Průměr výtažku v n-té/konečné operaci	[mm]
d_s	Střední průměr výtažku	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	[MPa]
F_1	Tažná síla pro tažení rohů u nerotačních výtažků	[N]
F_2	Tažná síla pro tažení rovných částí u nerotačních výtažků	[N]
F_c	Celková tažná síla	[N]
F_{max}	Maximální tažná síla	[N]
F_{mlis}	Tažná síla v případě použití mechanického listu	[N]
F_p	Síla potřebná ke stlačení přidržovače	[N]
F_{skut}	Skutečná tažná síla	[N]
F_t	Okamžitá tažná síla	[N]
g	Počet tahů	[–]
H	Výška výtažku	[mm]
H_z	Výška zdvihu nástroje	[mm]
h_0	Počáteční hloubka tažení	[m]
h_1	Konečná hloubka tažení	[m]
K	Koeficient tažení	[–]
L	Součet délek rovných stěn výtažku	[mm]
m	Součinitel tažení	[–]
m_1	Součinitel tažení v 1. tažné operaci	[–]
m_{90°	Součinitel tažení čtvercové nádoby	[–]
\overline{m}_{90°	Průměrný součinitel tažení čtvercové nádoby	[–]
$m_{90^\circ A}$	Součinitel tažení čtvercové nádoby o délce A	[–]
$m_{90^\circ B}$	Součinitel tažení čtvercové nádoby o délce B	[–]
m_{180°	Součinitel tažení oválné nádoby	[–]
\overline{m}_{180°	Průměrný součinitel tažení oválné nádoby	[–]
$m_{180^\circ A}$	Součinitel tažení oválné nádoby o délce A	[–]
$m_{180^\circ B}$	Součinitel tažení oválné nádoby o délce B	[–]
m_c	Celkový součinitel tažení	[–]
m_{hn}	Součinitel tažení hranatého výtažku v n-té operaci	[–]
m_i	Součinitel tažení i-té tažné operace	[–]

m_k	Kritický součinitel tažení	[–]
m_{rn}	Součinitel tažení rotačního výtažku v n-té operaci	[–]
m_s	Střední součinitel tažení	[–]
m_α	Součinitel tažení pro úhel α	[–]
N	Celkové náklady na výrobu jednoho kusu	[Kč · ks ⁻¹]
N_{mat}	Náklady na materiál	[Kč · ks ⁻¹]
\bar{N}_{mzd}	Průměrná hodinová mzda dělníka/ů	[Kč · hod ⁻¹]
N_{nst}	Náklady na nástroj	[Kč · ks ⁻¹]
N_{str}	Náklady na stroj	[Kč · ks ⁻¹]
N_{uns}	Náklady na údržbu nástroje	[Kč · ks ⁻¹]
N_{ust}	Náklady na údržbu stroje	[Kč · ks ⁻¹]
n	Koeficient normálové anizotropie	[–]
n_{ds}	Počet dávek v jedné směně	[–]
n_{kd}	Počet kusů v jedné dávce	[ks]
n_{op}	Počet operací prováděných na jednom stroji	[–]
n_v	Celkový počet vyrobených kusů	[ks]
P_n	Poměr součinitelů tažení v n-té operaci	[–]
p_p	Měrný tlak přidržovače	[MPa]
R	Redukce	[%]
R_b	Poloměr zaoblení v rohu výtažku	[mm]
R_d	Poloměr zaoblení u dna výtažku	[mm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
R_{max}	Maximální hodnota redukce	[%]
R_{te}	Poloměr zaoblení funkční hrany tažnice	[mm]
R_{tu}	Poloměr zaoblení funkční hrany tažníku	[mm]
r	Koeficient plošné anizotropie	[–]
S_m	Plocha mezikruží válcového výtažku kolmá na směr působící tažné síly	[mm ²]
S_p	Plocha přidržovaná přidržovačem	[mm ²]
t	Tloušťka přístříhu	[mm]
t_d	Dávkový čas	[s]
t_{dv}	Dávkový vedlejší čas	[s]
t_{dz}	Dávkový ztrátový čas	[s]
t_j	Jednotkový čas	[s]
t_{jh}	Jednotkový hlavní čas	[s]
t_{jv}	Jednotkový vedlejší čas	[s]
t_{jz}	Jednotkový ztrátový čas	[s]
t_s	Směnový čas	[s]
t_{sv}	Směnový vedlejší čas	[s]
t_{sz}	Směnový ztrátový čas	[s]
v	Tažná vůle	[mm]
v_t	Tažná rychlost	[m · min ⁻¹]
w	Konstanta	[–]
Z	Kontrakce	[%]
z	Tažná mezera	[mm]

α	Úhel rohu výtažku	[°]
μ	Poissonův poměr	[–]
μ_f	Součinitel tření	[–]
ρ	Hustota	kg · m ^{–3}

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Athénská mince, 449–404 př. n. l. [1], [2]	9
Obr. 2 Nábytkový závěs [3]	9
Obr. 3 Kuchyňský dřez [4]	9
Obr. 4 Sada hrnců [5]	9
Obr. 5 Řešená součást – rohový dřez	10
Obr. 6 Výroba rohového dřezu kombinací tažení a svařování	11
Obr. 7 Schéma metody Hydroform [12], [13]	12
Obr. 8 Příklad jednooperačního tažení válcového výtažku konvenčním nástrojem [14]	12
Obr. 9 Struktura martenzitické korozivzdorné oceli [24]	14
Obr. 10 Struktura feritické korozivzdorné oceli [24]	14
Obr. 11 Struktura austenitické korozivzdorné oceli [24]	14
Obr. 12 Deformace zrn materiálu v důsledku válcování [1], [12]	15
Obr. 13 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci anizotropního materiálu zatěžovaného pod úhlem 0°, 45° a 90° [1], [23]	15
Obr. 14 Příklad cípatého výtažku	15
Obr. 15 Schéma napjatosti a deformace při tažení válcového výtažku s přídržovačem [12]	16
Obr. 16 Tvarově složitý výtažek [15]	18
Obr. 17 Vzdálenost mezi středy rohů výtažku [27]	19
Obr. 18 Poloměr zaoblení funkční hrany tažníku a tažnice	22
Obr. 19 Příklad tažení bez přídržovače s výrazným zvlněním [14]	23
Obr. 20 Vůle mezi tažníkem a tažnicí [15]	24
Obr. 21 Graf pro určení součinitele BF [10]	26
Obr. 22 Příklad průběhu tažné síly v závislosti na okamžité hloubce během tažení válcového výtažku [12]	26
Obr. 23 Křivka opotřebení tvářecího nástroje [33]	28
Obr. 24 Příklad konstrukčního řešení brzdných žebířků [31]	29
Obr. 25 Schéma hydraulického lisu [34]	29
Obr. 26 Schéma klikového lisu [34]	29
Obr. 27 Základní rozměry výtažku	33
Obr. 28 Ilustrace aplikovaných zjednodušení	35
Obr. 29 Rozvinutý tvar výtažku	35
Obr. 30 Parametry rohů hlavního dřezu	36
Obr. 31 Parametry rohů vedlejšího dřezu	39
Obr. 32 Rozvinutý tvar výtažku s přídatkem na ostřížení	42
Obr. 33 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD	45
Obr. 34 Rohový dřez po úpravě geometrie – 2. verze	45
Obr. 35 Parametry rohů hlavního dřezu – 2. verze	46
Obr. 36 Parametry rohů vedlejšího dřezu – 2. verze	49
Obr. 37 Rozvinutý tvar výtažku s přídatkem na ostřížení – 2. verze	52
Obr. 38 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD – 2. verze	54
Obr. 39 Rohový dřez po úpravě geometrie – 3. verze	54
Obr. 40 Rozvinutý tvar výtažku s přídatkem na ostřížení – 3. verze	58
Obr. 41 Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD – 3. verze	59
Obr. 42 Schéma tažidla v konfiguraci pro 1. tažnou operaci	60
Obr. 43 Tažnice pro 1. operaci	61
Obr. 44 Tažnice pro 2. operaci a pro lemování	61
Obr. 45 Schéma vyhazovače hlavního dřezu	61
Obr. 46 Přídržovač pro 1. operaci	62

Obr. 47 Přidržovač pro 2. operaci	62
Obr. 48 Vložka přidržovače pro 2. operaci	62
Obr. 49 Přidržovač pro lemování	62
Obr. 50 Tažník pro 1. operaci	62
Obr. 51 Tažník pro tažení vedlejšího dřezu v 2. operaci	62
Obr. 52 Tažník pro lisování okapnice v 2. operaci	63
Obr. 53 Lemovací nástroj.....	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Závislost maximální výšky na poloměru zaoblení rohů výtažku v první tažné operaci [10].....	19
Tab. 2 Hodnoty součinitelů tažení m_{180° pro tažení oválných nádob [27].....	19
Tab. 3 Hodnoty součinitele tažení m_{90° pro tažení čtvercových nádob [27]	20
Tab. 4 Koeficienty tažení pro válcové výtažky s přírubou [27].....	21
Tab. 5 Minimální hodnoty poloměru zaoblení funkční hrany tažníku [15]	21
Tab. 6 Doporučené tlaky přidržovače [15]	23
Tab. 7 Doporučené tažné rychlosti podle Tišnovského [10].....	25
Tab. 8 Doporučené materiály tažidla podle Tišnovského [10]	28
Tab. 9 Maziva, jejich využití, výhody a nevýhody [10]	30
Tab. 10 Mechanické vlastnosti materiálu 1.4301 ve vyžáhaném stavu [36], [37]	33
Tab. 11 Chemické složení materiálu 1.4301 [36]	33
Tab. 12 Požadavky na hydraulický lis	63
Tab. 13 Zvolené/odhadnuté parametry pro výpočet nákladů varianty 1 stroj, 1 nástroj.....	65
Tab. 14 Zvolené/odhadnuté parametry pro výpočet nákladů varianty 3 stroje, 3 nástroje ..	66
Tab. 15 Součinitel AF pro výpočet tažné síly při použití mechanického lisu [10].....	82

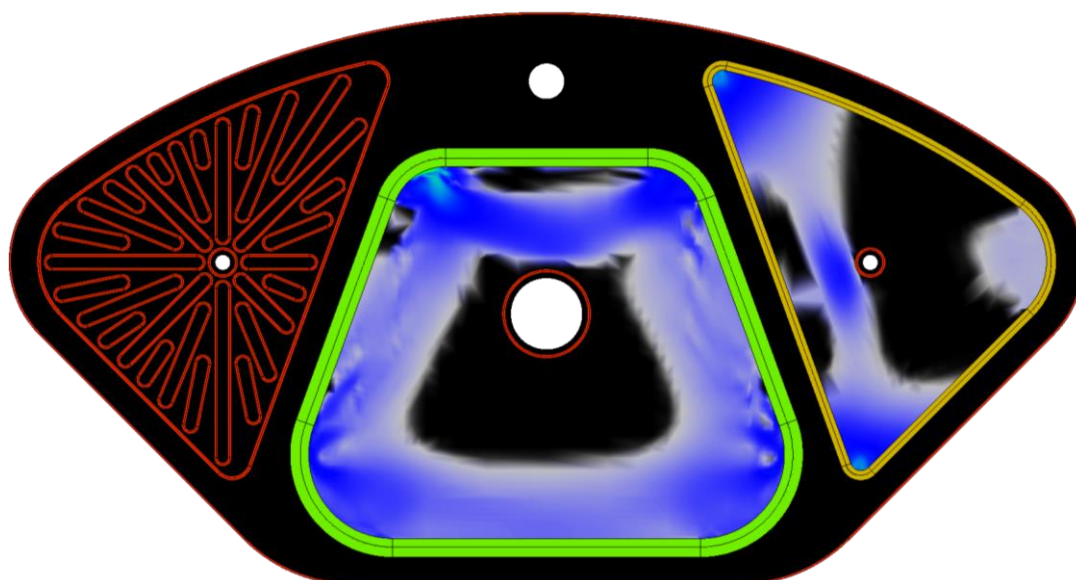
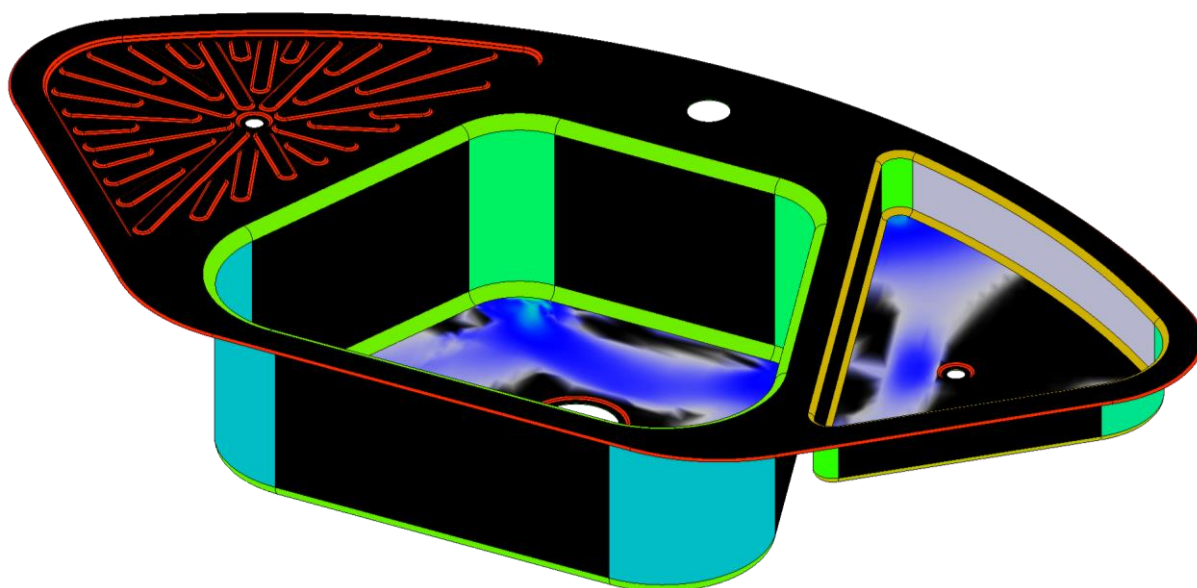
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 - Vizualizace křivosti řešené součásti
- Příloha 2 - Běžné hodnoty pevností vybraných materiálů v tahu podle Tišnovského
- Příloha 3 - Součinitel A_F pro výpočet tažné síly při použití mechanického lisu
- Příloha 4 - Příklad tvorby rozvinutého tvaru výtažku pomocí programu SolidWorks
- Příloha 5 - Smluvní tahový diagram oceli 1.4301
- Příloha 6 - Rovnání zadané součásti s vyznačením stacionárního bodu v programu SolidWorks
- Příloha 7 - Graf závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci oceli 1.4301 včetně aproximace polynomem 1. a 2. stupně
- Příloha 8 - Graf závislosti anizotropie na směru zatěžování
- Příloha 9 - Keeler-Goodwinův diagram oceli 1.4301
- Příloha 10 - Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD a vizualizace bodů na modelu v FLD 1. verze řešené součásti
- Příloha 11 - Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD a vizualizace bodů na modelu v FLD 2. verze zadané součásti
- Příloha 12 - Vyhodnocení oblastí modelu na základě FLD a vizualizace bodů na modelu v FLD 3. verze zadané součásti
- Příloha 13 - Konečná tloušťka stěn 3. verze zadané součásti
- Příloha 14 - Graf závislosti síly na dráze v první operaci 3. verze zadané součásti
- Příloha 15 - Graf závislosti síly na dráze v druhé operaci 3. verze zadané součásti
- Příloha 16 - Graf závislosti síly na dráze při lemování 3. verze zadané součásti
- Příloha 17 - Informace k trojčinnému hydraulickému lisu PO 160/100 od firmy Dieffenbacher

SEZNAM VÝKRESŮ

- Výkres 1 - 2019-DP-171360-S1
- Výkres 2 - 2019-DP-171360-S2
- Výkres 3 - 2019-DP-171360-S3
- Výkres 4 - 2019-DP-171360-18
- Výkres 5 - 2019-DP-171360-D1
- Výkres 5 - 2019-DP-171360-D2

PŘÍLOHA 1 – VIZUALIZACE KŘIVOSTI ŘEŠENÉ SOUČÁSTI



**PŘÍLOHA 2 – BĚŽNÉ HODNOTY PEVNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ V TAHU
PODLE TIŠNOVSKÉHO [10]**

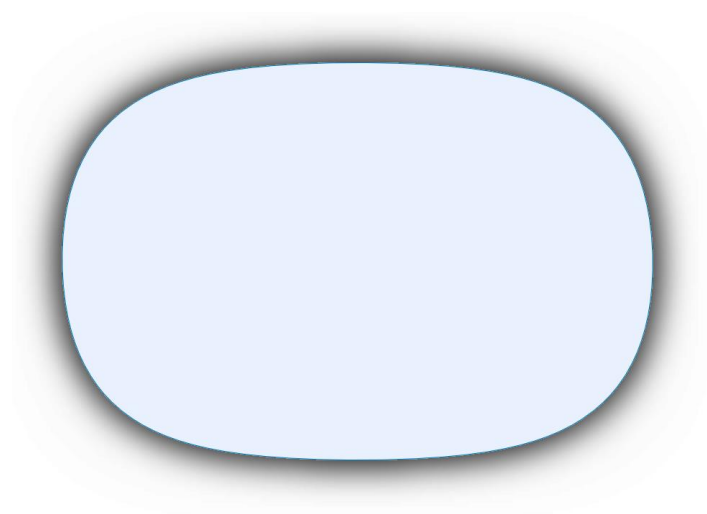
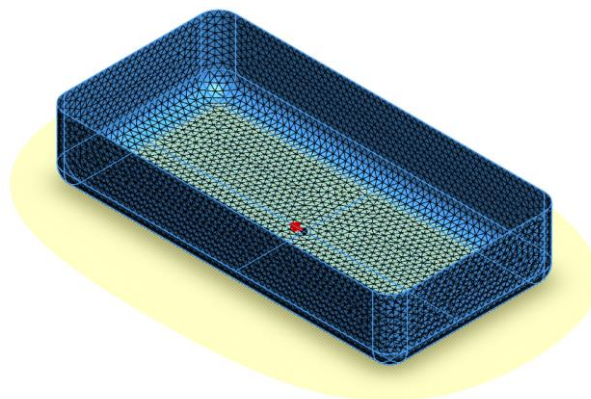
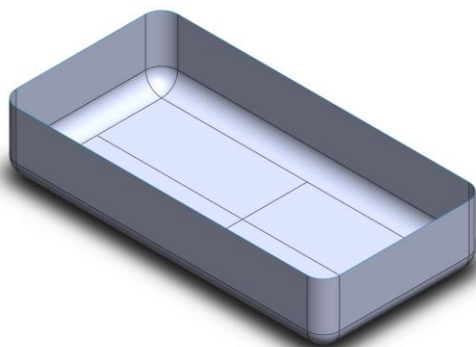
Tažený materiál	R_m [MPa] – po vyžhání	R_m [MPa] – zpevněný po tváření za studena
Běžný ocelový plech	340	450
Hlubokotažný ocelový plech	320	420
Tvrký ocelový plech	500	850
Křemíkový ocelový plech	500	620
Korozivzdorná ocel	600	750
Mosazný plech	300	400
Měděný plech	200	320
Bronzový plech	400	600
Olověný plech	20	
Zinkový plech	180	200
Cínový plech	35	40
Hliníkový plech	70	160
Duralový plech	420	500

PŘÍLOHA 3 - SOUČINITEL A_F PRO VÝPOČET TAŽNÉ SÍLY PŘI POUŽITÍ MECHANICKÉHO LISU [10]

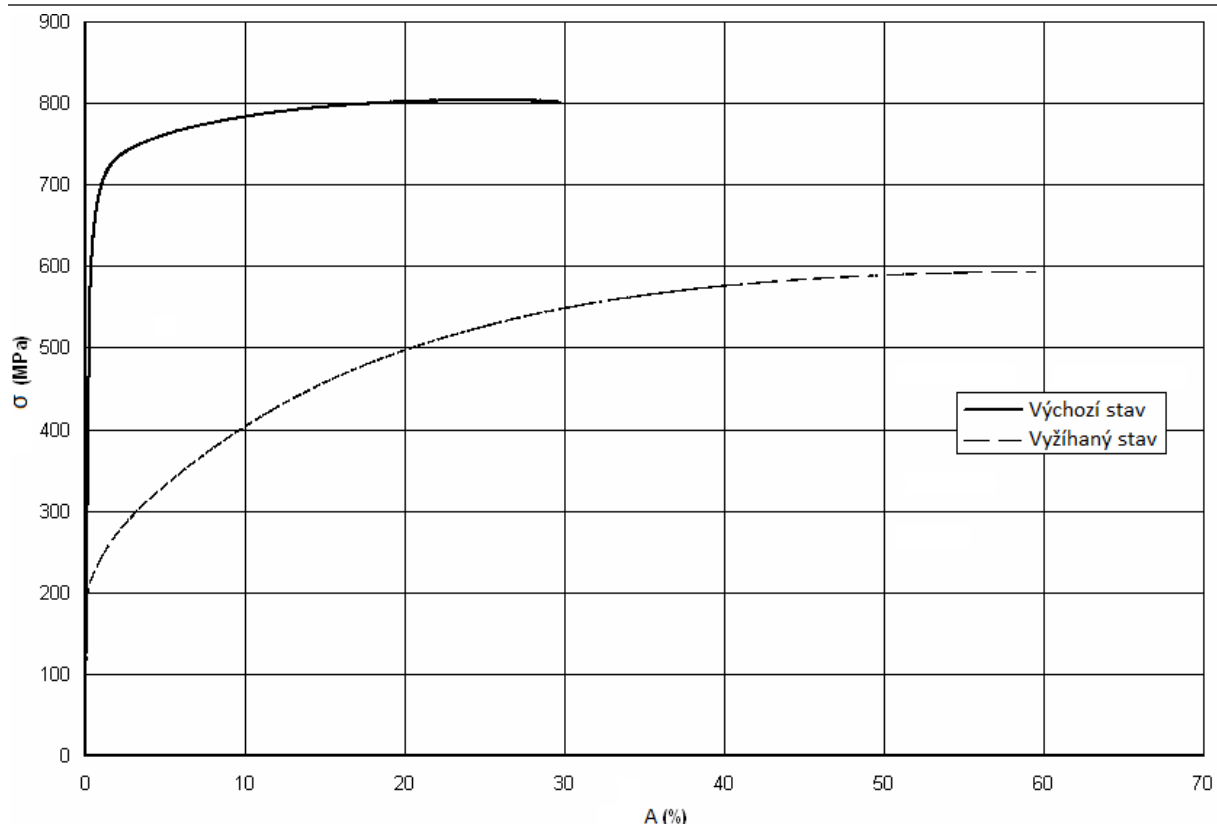
Tab. 15 Součinitel A_F pro výpočet tažné síly při použití mechanického lisu [10]

Hloubka výtažku H [mm]	A_F [-]
⟨0; 25⟩	1,00
⟨25; 50⟩	1,50
⟨50; 75⟩	1,75
⟨75; 100⟩	2,00
⟨100; 150⟩	2,50
⟨150; 200⟩	2,75
⟨200; 250⟩	3,00
⟨250; 300⟩	3,25
⟨300; 350⟩	3,50
⟨350; 400⟩	3,75
⟨400; 450⟩	4,00
⟨450; 500⟩	4,25
⟨500; 550⟩	4,50
⟨550; 600⟩	4,75

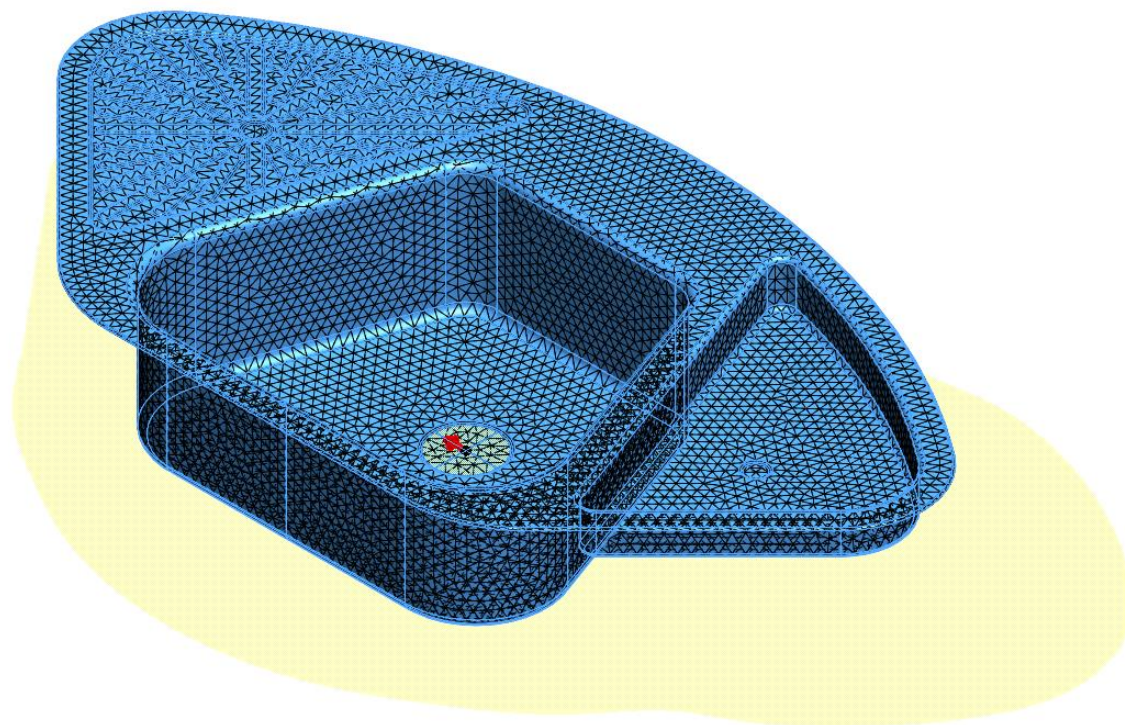
PŘÍLOHA 4 – PŘÍKLAD TVORBY ROZVINUTÉHO TVARU VÝTAŽKU POMOCÍ PROGRAMU SOLIDWORKS



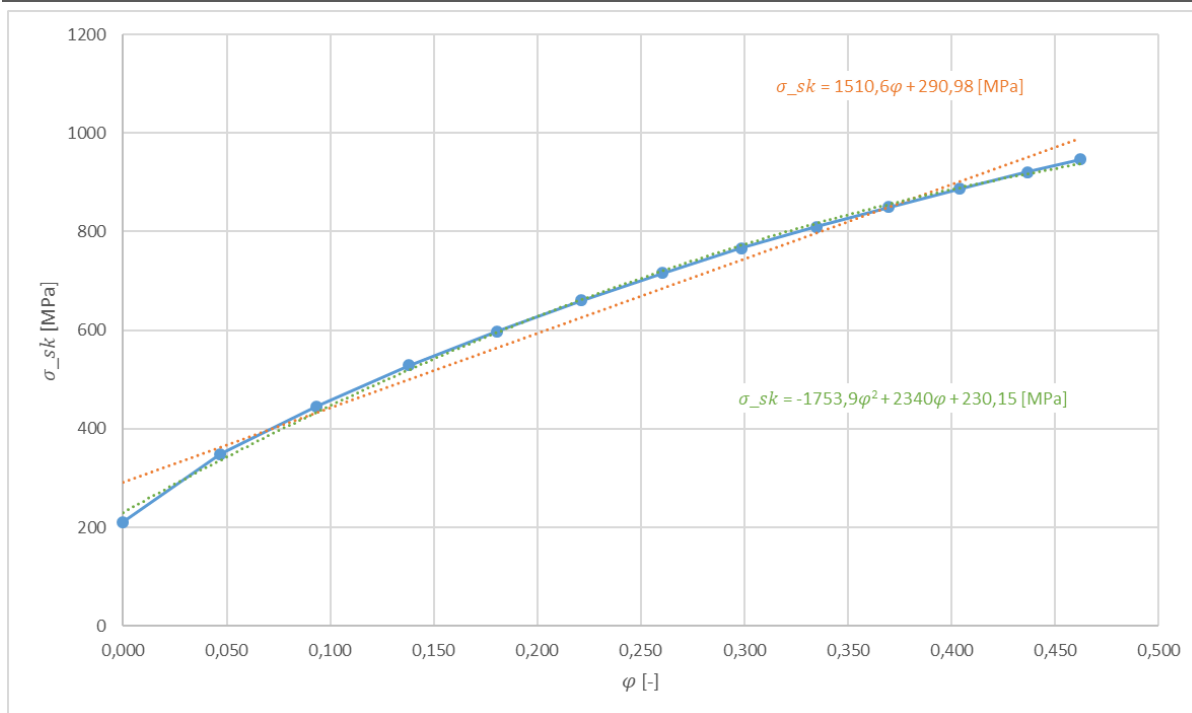
PŘÍLOHA 5 – SMLUVNÍ TAHOVÝ DIAGRAM OCELI 1.4301 [37]



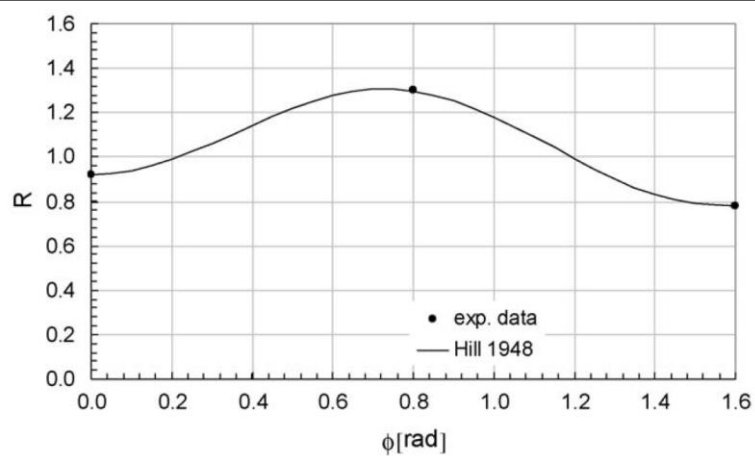
PŘÍLOHA 6 – ROVNÁNÍ ZADANÉ SOUČÁSTI S VYZNAČENÍM STACIONÁRNÍHO BODU V PROGRAMU SOLIDWORKS



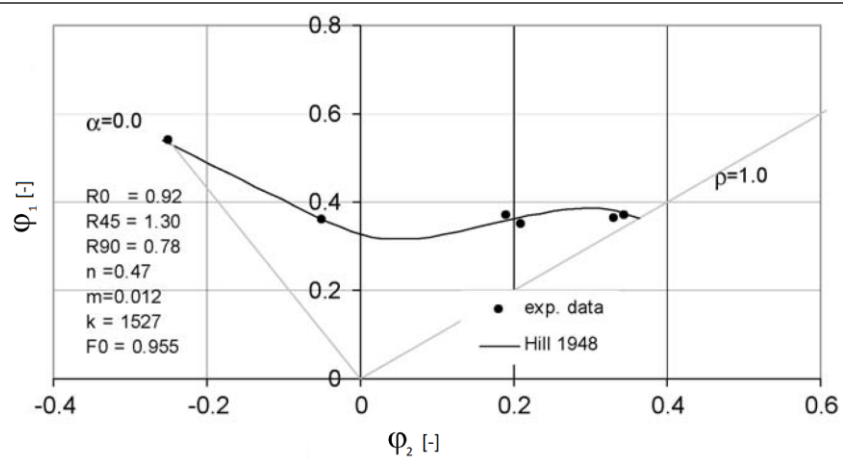
PŘÍLOHA 7 – GRAF ZÁVISLOSTI SKUTEČNÉHO NAPĚTÍ NA SKUTEČNÉ DEFORMACI OCELI 1.4301 VČETNĚ APROXIMACE POLYNOMEM 1. A 2. STUPNĚ



PŘÍLOHA 8 – GRAF ZÁVISLOSTI ANIZOTROPIE NA SMĚRU ZATĚŽOVÁNÍ [38]



PŘÍLOHA 9 – KEELER-GOODWINŮV DIAGRAM OCELI 1.4301 [38]



PŘÍLOHA 10 – VYHODNOCENÍ OBLASTÍ MODELU NA ZÁKLADĚ FLD A VIZUALIZACE BODŮ NA MODELU V FLD 1. VERZE ŘEŠENÉ SOUČÁSTI

FLD (strain) - Zones by quality - Membrane

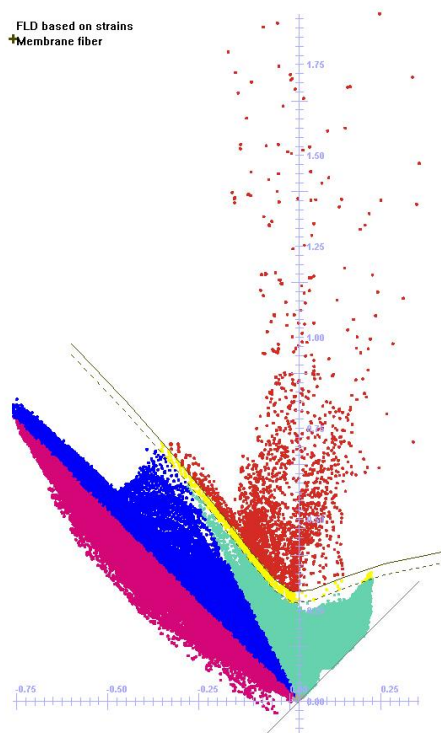
Project 'Soldan02'
Module 'State 6' end : Prog. = -0.001294'

- Strong wrinkling trend (6)
- Wrinkling trend (5)
- Insufficient stretching (4)
- Safe (3)
- Marginal zone (2)
- Cracks (1)



Project 'Soldan02'
Module 'State 6' end : Prog. = -0.001294'

FLD based on strains
+ Membrane fiber

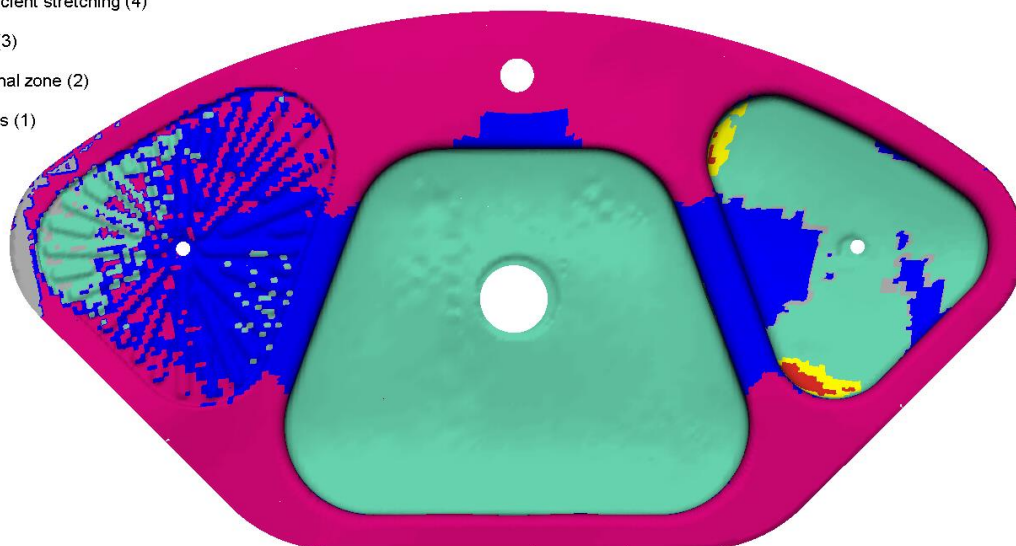


PŘÍLOHA 11 – VYHODNOCENÍ OBLASTÍ MODELU NA ZÁKLADĚ FLD A VIZUALIZACE BODŮ NA MODELU V FLD 2. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI

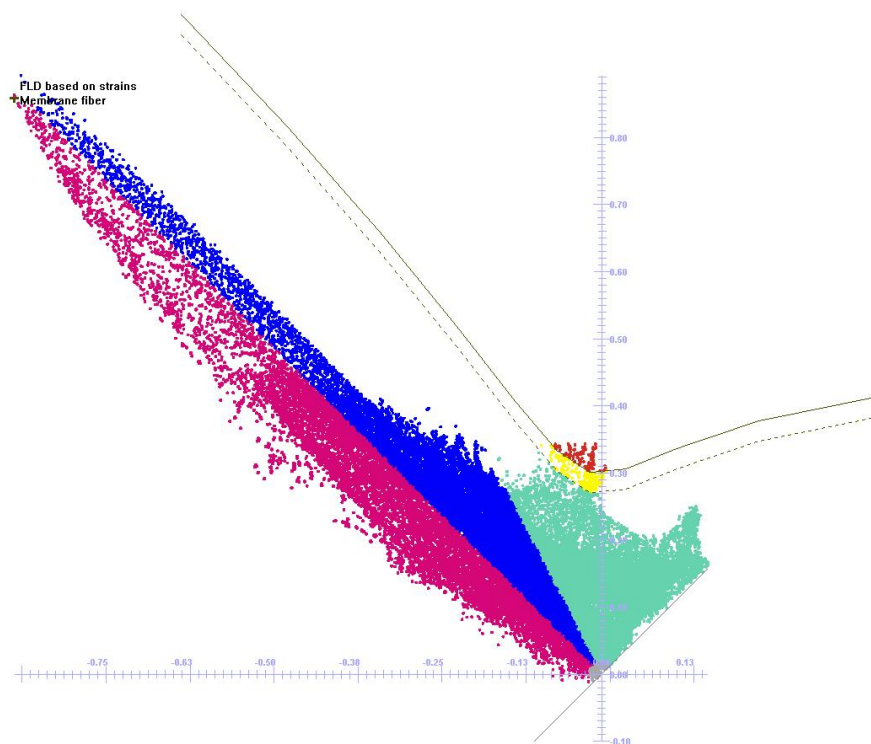
FLD (strain) - Zones by quality - Membrane

Project 'Soldan04'
Module 'State 10/end : Time = 100.000000'

- Strong wrinkling trend (6)
- Wrinkling trend (5)
- Insufficient stretching (4)
- Safe (3)
- Marginal zone (2)
- Cracks (1)



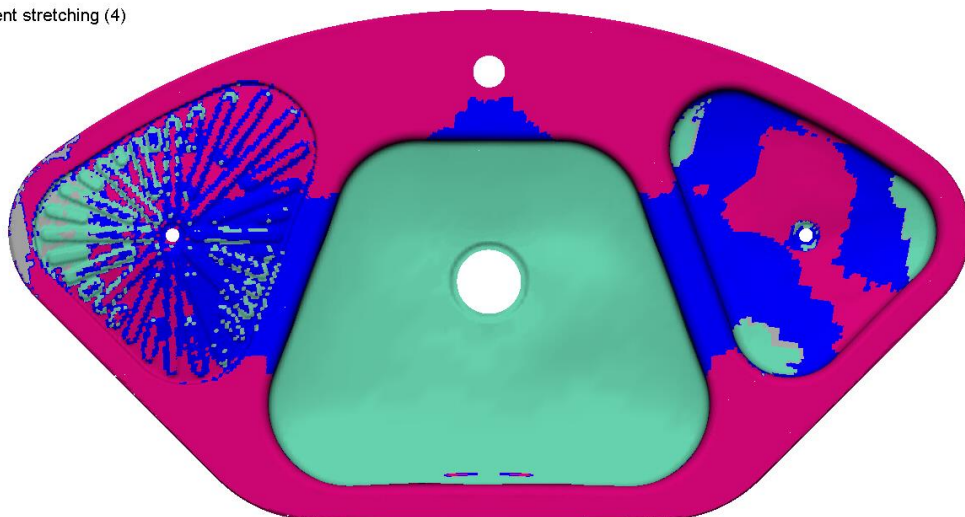
Project 'Soldan04'
Module 'State 10/end : Time = 100.000000'



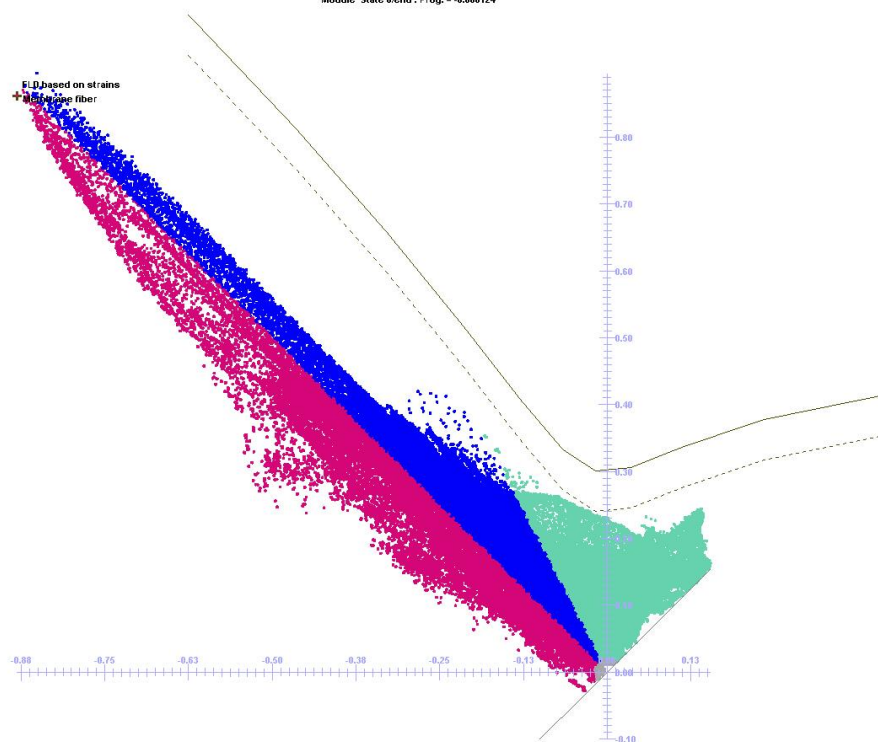
PŘÍLOHA 12 – VYHODNOCENÍ OBLASTÍ MODELU NA ZÁKLADĚ FLD A VIZUALIZACE BODŮ NA MODELU V FLD 3. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI

FLD (strain) - Zones by quality - Membrane

Project "Simulace.06"
Module "State 8/end : Prog. = -0.000124"



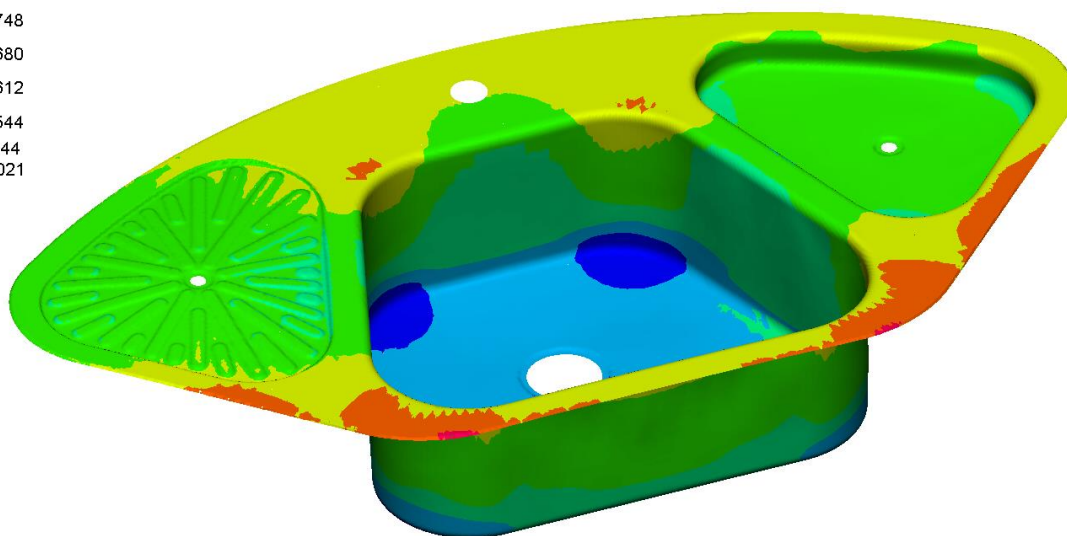
Project "Simulace.06"
Module "State 8/end : Prog. = -0.000124"



PŘÍLOHA 13 – KONEČNÁ TLOUŠŤKA STĚN 3. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI

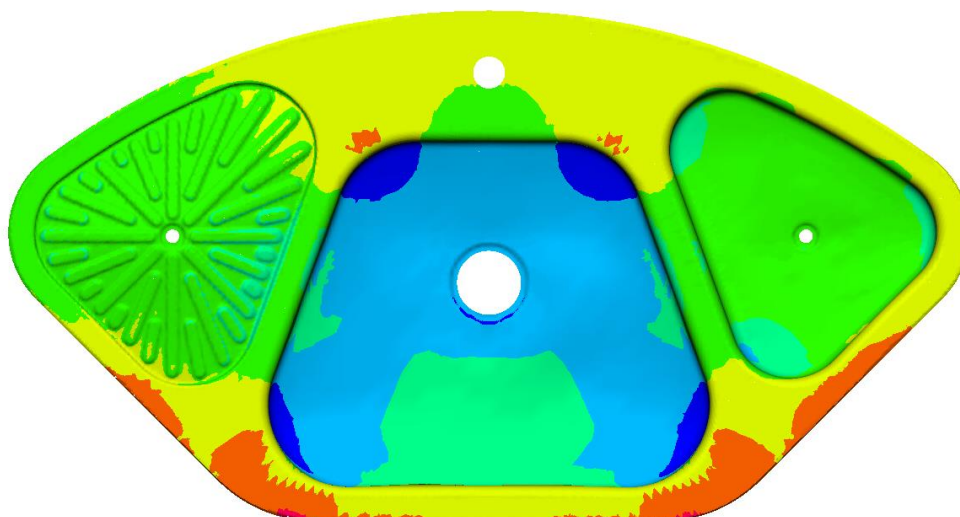
Thickness
1.021
0.953
0.885
0.817
0.748
0.680
0.612
0.544
Min = 0.544
Max = 1.021

Project "Simulace.06"
Module "State 8 end : Prog. = -0.000124"

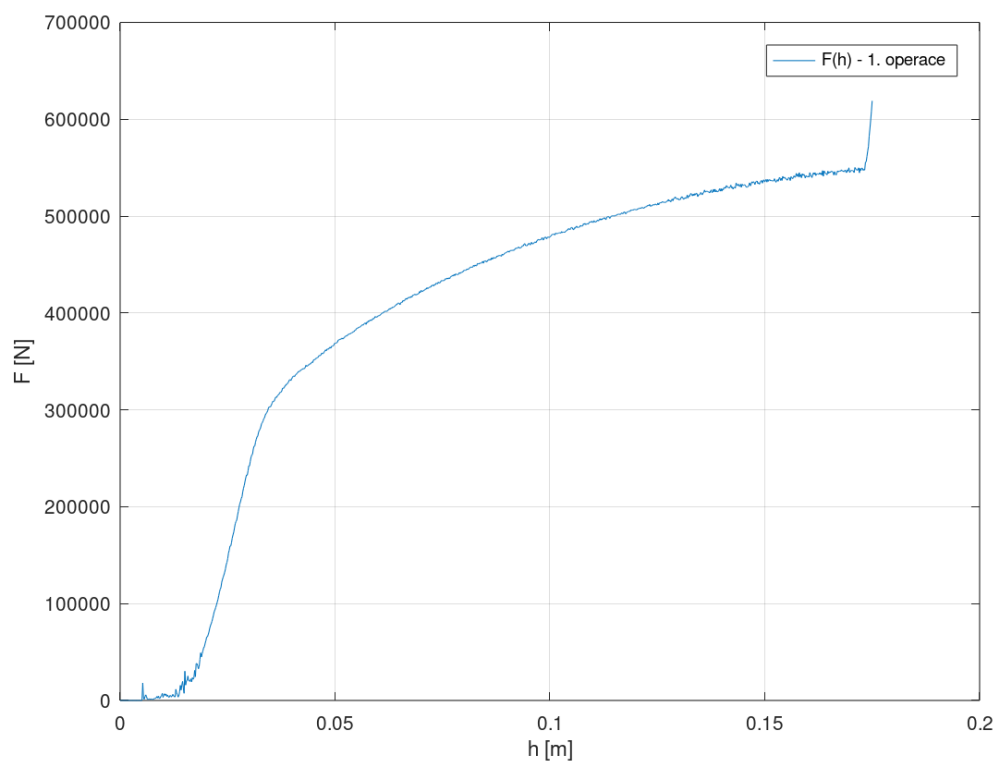


Thickness
1.021
0.953
0.885
0.817
0.748
0.680
0.612
0.544
Min = 0.544
Max = 1.021

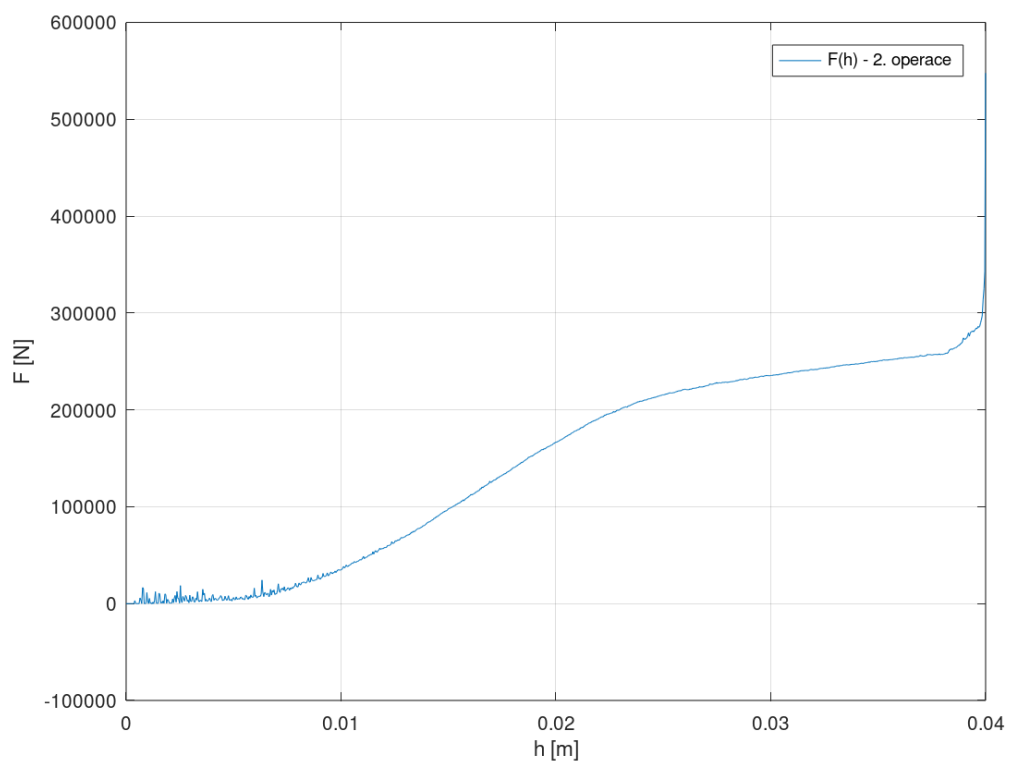
Project "Simulace.06"
Module "State 8 end : Prog. = -0.000124"



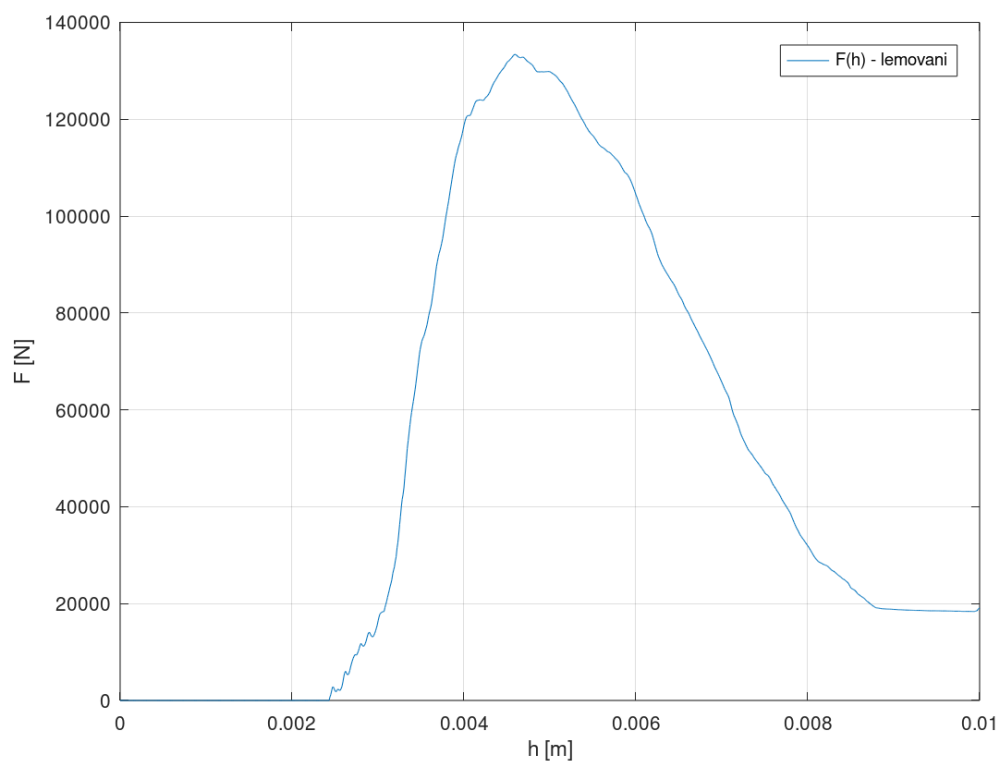
PŘÍLOHA 14 – GRAF ZÁVISLOSTI SÍLY NA DRÁZE V PRVNÍ OPERACI 3. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI



PŘÍLOHA 15 – GRAF ZÁVISLOSTI SÍLY NA DRÁZE V DRUHÉ OPERACI 3. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI



PŘÍLOHA 16 – GRAF ZÁVISLOSTI SÍLY NA DRÁZE PŘI LEMOVÁNÍ 3. VERZE ZADANÉ SOUČÁSTI



PŘÍLOHA 17 – INFORMACE K TROJČINNÉMU HYDRAULICKÉMU LISU PO 160/100 OD FIRMY DIEFFENBACHER [40]

HYDRAULICKÉ LISY PRO PLOŠNÉ TVÁŘENÍ PLECHŮ

PC 100

Hydraulický lis pro zkoušení nástrojů na tažení a tvarování výlisků z plechu

Odběratel: firma OEZ s.r.o., Letohrad

Realizace: VIII/2012

Základní parametry:

Tvářecí síla	1 000 kN
Zdvih	500 mm
Sevřená výška	200 mm
Velikost stolu	1 000 x 700 mm
Tvářecí rychlost (max. síla)	14 mm/s

Vybavení lisu:

- spodní přidržovač o síle 400 kN
- hydraulicky přiváděvané listy ve stolní desce
- pohyblivý ochranný kryt



www.dieffenbacher.cz

PO 160/100

Hydraulický trojčinný lis na tažení výlisků z plechu

Odběratel: firma WSK "PZL-Rzeszów", Polsko

Realizace: IV/2008

Základní parametry:

Tažný beran	
Tvářecí síla	1 600 kN
Zdvih	750 mm
Upínací plocha	650 x 650 mm
Tvářecí rychlost (max. síla)	33 mm/s

Spodní přidržovač	
Přidržovací síla	1 000 kN
Zdvih	300 mm
Plocha přidržovače	1 000 x 800 mm

Technologické možnosti:

- tažení s přidržovacím beranem
- tažení se spodním přidržovačem (spojen tažný a přidržovací beran)
- kombinované tažení s přidržovacím beranem a spodním přidržovačem



Přidržovací beran	
Přidržovací síla	1 000 kN
Zdvih	405 mm
Upínací plocha	1 200 x 1 000 mm



Strana 3